



CENTRO UNIVERSITÁRIO DE BRASÍLIA - UniCEUB
CURSO DE ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

CAMILLA CRISTINE DE SOUZA OLIVEIRA

MÉTODOS DE ASSOCIAÇÃO EM REDES IEEE 802.11

Orientador: Prof. MsC Francisco Javier de Obaldia

Brasília
Março, 2011.

CAMILLA CRISTINE DE SOUZA OLIVEIRA

MÉTODOS DE ASSOCIAÇÃO EM REDES IEEE 802.11

Trabalho apresentado ao Centro
Universitário de Brasília
(UniCEUB) como pré-requisito
para a obtenção de Certificado de
Conclusão de Curso de Engenharia
de Computação.

Orientador: Prof. MsC. Francisco
Javier de Obaldia

Brasília
Março, 2011.

CAMILLA CRISTINE DE SOUZA OLIVEIRA

MÉTODOS DE ASSOCIAÇÃO EM REDES IEEE 802.11

Trabalho apresentado ao Centro
Universitário de Brasília
(UniCEUB) como pré-requisito
para a obtenção de Certificado de
Conclusão de Curso de Engenharia
de Computação.

Orientador: Prof. MsC. Francisco
Javier de Obaldia

Este Trabalho foi julgado adequado para a obtenção do Título de Engenheiro de Computação,
e aprovado em sua forma final pela Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas -
FATECS.

Prof. Abiezer Amarilia Fernandez
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. MsC. Francisco Javier de Obaldia
Orientador

Prof. MsC. Luis Claudio Lopes de Araújo
UniCEUB

Prof. MsC. Marco Antônio de Araújo
UniCEUB

*Dedico este trabalho a minha
família, alicerce na estruturação da minha
personalidade, exemplo de conduta,
dignidade e amor para mim.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, por todas as portas abertas, por estar sempre ao meu lado e por ser um amigo fiel.

Aos meus pais, Edson Gomes e Leila Cristine, que por muitas vezes abriram mão dos seus sonhos para que hoje eu pudesse estar realizando o meu. Paizinho e Mãezinha, vocês me ensinaram o que é amor incondicional.

À minha família, o meu alicerce. Como eu amo e admiro cada um de vocês.

As minhas grandes amigas e companheiras, Mariana Melato e Juliana Ribeiro, por todas as palavras de incentivo e por todo amor.

Aos novos grandes amigos que fiz durante os cinco anos de curso. Vocês tornaram a minha escolha mais agradável. Ficam na lembrança os papos, as brincadeiras, os lanches, as trocas de conhecimento e toda a cumplicidade que existiu. Jovens engenheiros, sucesso em tudo o que se proporem a fazer.

Ao UniCEUB e a todos os grandes amigos que conquistei na Divisão de Gestão em TI. Sou grata pela oportunidade, por acreditarem no meu trabalho e por tudo o que me ensinaram. Devo grande parte da realização desse sonho a vocês.

Ao amigo e professor Francisco Javier, pelo voto de confiança, por todo o apoio, acolhimento e troca de conhecimento durante os cinco anos de curso.

Muito obrigada!

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	8
RESUMO	9
ABSTRACT	10
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	11
1.1 – MOTIVAÇÃO.....	11
1.2 – APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA.....	12
1.3 – OBJETIVOS DO TRABALHO	12
1.4 – ESTRUTURA DA MONOGRAFIA	13
CAPÍTULO 2 - REFERENCIAL TEÓRICO.....	15
2.1 – REDES IEEE 802.11	15
2.1.1 – Padrões IEEE.....	15
2.1.2 – Modos de Operação	16
2.1.3 – Tipos de Estação.....	19
2.1.4 – Camada Física	19
2.1.5 – Camada de Enlace.....	20
2.1.6 – IEEE 802.11e.....	23
2.1.7 – Associação.....	24
2.2 – BALANCEAMENTO DINÂMICO DE CARGA	25
2.2.1 – Algoritmo DLBA.....	26
2.3 – BALANCEAMENTO DE CARGA UTILIZANDO VIRTUALIZAÇÃO	28
2.3.1 – Virtualização de Redes IEEE 802.11.....	28
2.3.2 – Padrão IEEE 802.11k.....	30
2.3.3 – IAPP	31
2.3.4 – Algoritmo Balanceamento de Carga Utilizando Virtualização	32
2.3.4.1 – Suporte do padrão IEEE 802.11k	34
2.3.4.2 – Algoritmo de Cálculo de Pesos	35
CAPÍTULO 3 – DESENVOLVIMENTO DO PROJETO.....	37
3.1 – AMBIENTE DE SIMULAÇÕES E METODOLOGIA.....	37
3.2 – IMPLEMENTAÇÃO DO PROJETO	39
3.3 – SIMULADOR NS-2.....	39

3.4 – IMPLEMENTAÇÕES NO NS-2	41
CAPÍTULO 4 – TESTES E RESULTADOS.....	45
4.1 – TESTES.....	45
4.2 – ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	45
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	49
5.1 – CONCLUSÕES.....	49
5.2 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	50
REFERÊNCIAS	51
APÊNDICE – CÓDIGO DE SIMULAÇÃO.....	54
ANEXO – INSTALAÇÃO DO NS-2.....	61

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Redes sem fio ao longo do tempo..	11
Figura 2.1 – As sete camadas do modelo OSI.....	15
Figura 2.2 – Relação do padrão IEEE com o Modelo OSI.	16
Figura 2.3 – Redes <i>ad hoc</i>	17
Figura 2.4 – Rede IEEE 802.11 infraestruturada.....	18
Figura 2.5 – <i>Extended Service Set</i>	18
Figura 2.6 – Camadas físicas.....	20
Figura 2.7 – O problema da estação oculta.	21
Figura 2.8 – O problema da estação exposta.....	21
Figura 2.9 – Subcamadas MAC no padrão IEEE 802.11.....	22
Figura 2.10 – Subcamadas MAC no padrão IEEE 802.11e.....	23
Figura 2.11 – Exemplo de associação tradicional.	25
Figura 2.12 – Exemplo de associação com balanceamento de carga.	26
Figura 2.13 – Exemplo de virtualização baseada em FDMA.....	29
Figura 2.14 – Exemplo de virtualização baseada em TDMA.	29
Figura 2.15 – Exemplo de virtualização baseada em TDMA combinado com FDMA.....	30
Figura 2.16 – Exemplo de virtualização baseada em FH.....	30
Figura 2.17 – Representação do esquema de virtualização FH utilizando fatias de tempo.	33
Figura 2.18 – Escalonamento entre APs utilizando o protocolo IAPP.	34
Figura 3.1 – Topologia da simulação.....	40
Figura 3.2 – Correspondência entre objetos C++ e OTCL.	40
Figura 3.3 – Ilustração da execução de uma simulação no NS-2.	40
Figura 3.4 – Estrutura dos objetos de simulação.	41
Figura 3.5 – Exemplos de parâmetros configurados.....	43
Figura 4.1 – Gráficos de latência.	46
Figura 4.2 – Gráficos de vazão.....	47
Figura 4.3 – Gráficos de índice de justiça.	48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANSI	<i>American National Standards Institute;</i>
AP	<i>Access Point;</i>
BSS	<i>Basic Service Set;</i>
DCF	<i>Distributed Coordination Function;</i>
DLBA	<i>Dynamic Load Balance Algorithm;</i>
ESS	<i>Extended Service Set;</i>
FTP	<i>File Transfer Protocol;</i>
HC	<i>Hybrid Coordinator;</i>
HCCA	<i>HCF Controlled Channel Access;</i>
HCF	<i>Hybrid Coordination Function;</i>
IBSS	<i>Independent Basic Service Set;</i>
IAPP	<i>Inter-Access Point Protocol;</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers;</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization;</i>
LAN	<i>Local Area Network;</i>
LLC	<i>Logical Link Control;</i>
MAC	<i>Media Access Control;</i>
NS-2	<i>The Network Simulator ns-2;</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency-Division Multiplexing;</i>
OSI	<i>Open Systems Interconnection;</i>
QoS	<i>Quality of Service;</i>
PCF	<i>Point Coordination Function;</i>
SINR	<i>Signal to Interference-plus-Noise Ratio;</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol;</i>
WLAN	<i>Wireless Local Area Network.</i>

RESUMO

O aumento expressivo do uso das redes IEEE 802.11 faz com que, em determinados locais, múltiplos pontos de acesso estejam disponíveis. Na abordagem tradicional, cada estação decide em qual ponto de acesso se associar levando em conta apenas a relação sinal-ruído. Esse tipo de abordagem não garante o uso eficiente dos recursos e pode levar estações a obter baixo desempenho em termos de vazão. Neste trabalho, propostas que combinam a relação sinal-ruído, a carga em cada ponto de acesso e a capacidade de virtualização das redes sem fio serão analisadas. Ambas buscam a distribuição mais justa da carga e do número de estações associadas em cada ponto de acesso. Resultados de simulações demonstram o desempenho dessas propostas em termos de vazão e latência. Através das simulações, o índice de justiça para cada proposta também é calculado. Além disso, os resultados permitem a análise de em que situações uma abordagem será mais vantajosa do que a outra.

Palavras Chave: IEEE 802.11; métodos de associação; balanceamento de carga; virtualização.

ABSTRACT

The significant increase in the use of IEEE 802.11 allows, in certain locations, multiple access points are available. In the traditional approach, each station decides which access point to associate, taking into account only noise signal. This approach does not guarantee the efficient use of resources and can lead to stations for low performance in terms of flow. In this work, the proposals that combine noise signal ratio, the load on each access point and the virtualization capabilities of wireless networks will be analyzed. Both seek a fairer distribution of the load and the number of stations associated with each access point. Simulation results demonstrate the performance of these proposals in terms of throughput and latency. Through simulations, the fairness index for each proposal is also calculated. In addition, the results allow the analysis of situations in which one approach will be more advantageous than the other.

Keywords: IEEE 802.11; association methods; load balancing; virtualization.

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1 – Motivação

Nos dias atuais, há uma grande disponibilidade de pontos de acesso sem fio IEEE 802.11. Redes deste padrão já estão presentes na maioria dos dispositivos móveis existentes e podem ser encontradas em cafeterias, hotéis, universidades, aeroportos, órgãos do setor público, dentre outros. Para ilustrar, pode-se citar um serviço de anúncio em redes sem fio chamado JiWire que tem um cadastro de mais de 450.000 *hotspots* espalhados por 140 países. Relatório publicado pela empresa no mês de janeiro, revela que o crescimento global das redes sem fio de acesso público desde 2006 é de 300%. Outro exemplo do crescimento vertiginoso das redes IEEE 802.11 é o número de equipamentos listados pelo site WiGLE.net, o qual ultrapassa 38 milhões. A Figura 1.1 apresenta um gráfico com o crescimento global das redes sem fio ao longo do tempo.

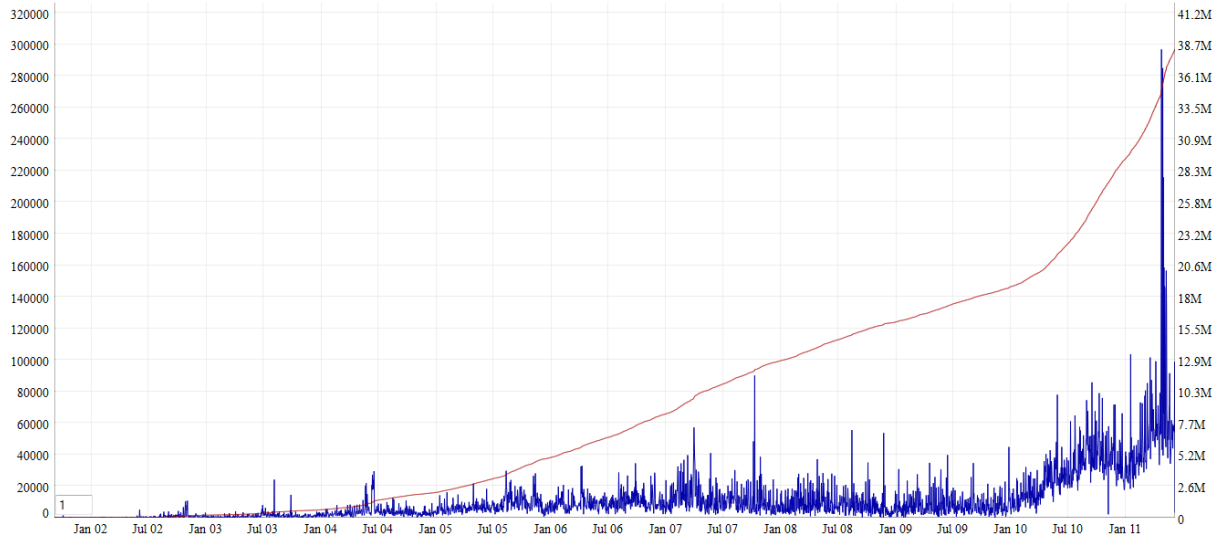


Figura 1.1: Redes sem fio ao longo do tempo

Fonte: (WiGLE.net)

1.2 – Apresentação do Problema

Com a popularização da rede sem fio, é comum encontrar cenários onde dois ou mais pontos de acesso podem ser utilizados a partir de uma mesma localização. Segundo o padrão IEEE 802.11, o ponto de acesso com maior relação sinal-ruído (SINR - *Signal to Interference-plus-Noise Ratio*) é o escolhido pela estação. Com a associação estabelecida, a estação permanece conectada a ele até que a conectividade seja perdida ou o usuário decida encerrar seu acesso (IEEE 802.11, 1999). Essa abordagem, muitas vezes, oferece ao usuário um serviço ruim.

Em sua abordagem tradicional, restrita apenas à sugestão do padrão IEEE, estações 802.11 ignoram as condições de carga e utilizam apenas a relação sinal-ruído para escolher em qual ponto de acesso devem associar-se. Esse tipo de associação não garante o uso eficiente dos recursos e gera desequilíbrio na largura de banda alocada para cada usuário (BEJERANO et al., 2004). Uma abordagem alternativa que foi explorada em outros trabalhos (BEJERANO et al., 2004; VILLEGAS et al., 2008; PAPANIKOS, LOGOTHETIS, 2001; SHEU, WU, 1999) consiste em realizar um balanceamento de carga entre os pontos de acesso. Entretanto, o conceito de carga leva em consideração apenas o número de estações e a relação sinal-ruído destas. Outra abordagem, proposta por (CARDOSO et al., 2009), baseia-se no balanceamento de carga, mas leva em consideração a vazão efetivamente utilizada pelas estações.

Visando a distribuição mais justa do número de estações associadas e da carga por AP, este trabalho propõe uma análise de três métodos de associação em redes IEEE 802.11. A abordagem tradicional (IEEE 802.11, 2007) será simulada e medidas de desempenho em termos de latência, vazão e justiça serão analisadas. Os resultados serão comparados aos apresentados no trabalho proposto (CARDOSO et al., 2009), onde a abordagem tradicional (IEEE 802.11, 1999), o balanceamento de carga DLBA (*Dynamic Load Balance Algorithm*) (SHEU, WU, 1999) e o balanceamento de carga utilizando virtualização (CARDOSO et al., 2009) são simulados.

1.3 – Objetivos do Trabalho

O objetivo deste trabalho é estudar, simular e analisar mecanismos de associação que realizem uma distribuição justa no número de estações associadas e na carga por AP, em

termos de vazão, latência e justiça, para cenários com redes IEEE 802.11. Considerando as diferenças entre cada caso, a proposta é mostrar em que situações uma abordagem é mais vantajosa do que a outra. As avaliações realizadas foram desenvolvidas com o auxílio da ferramenta de simulação de redes ns-2.

As principais contribuições deste trabalho são:

- O estudo dos problemas de desempenho e igualdade na distribuição de recursos com redes IEEE 802.11;

A abordagem tradicional, por ter como métrica apenas a relação sinal-ruído, gera um desbalanceamento no número de estações associadas em cada AP e, por conseguinte, não garante o uso eficiente de recursos da rede. Este trabalho realiza um estudo sobre o processo de associação tradicional e analisa o seu desempenho.

- Uma comparação de desempenho da abordagem tradicional com outros dois métodos de associação em redes IEEE 802.11;

Tendo em vista o uso ineficiente dos recursos de rede da abordagem tradicional, dois outros métodos de associação em redes IEEE 802.11 serão comparados. Um deles é o balanceamento de carga DLBA, que tem como métrica o número de estações associadas em cada AP e a média das relações sinal-ruído. Outro método é o balanceamento de carga utilizando virtualização, que tem como métrica relação sinal-ruído, carga e capacidade de virtualização.

- A proposta de um novo cenário de simulação para avaliação de desempenho.

A abordagem tradicional (IEEE 802.11, 2007) com o novo padrão de QoS (*Quality of Service*) será simulada e medidas de desempenho em termos de vazão, latência e justiça serão analisadas. Os resultados serão comparados aos apresentados no trabalho proposto por (CARDOSO et al., 2009), onde o balanceamento de carga DLBA e o balanceamento de carga utilizando virtualização são simulados. Esta comparação tem como objetivo demonstrar em que situações um método é mais vantajoso do que o outro.

1.4 – Estrutura da Monografia

Além deste capítulo introdutório, esta monografia está estruturada em mais três capítulos e organizada da seguinte maneira:

- Capítulo 2 – Arquitetura, Padrões e Implementação de Redes Sem Fios – Nesse capítulo é apresentado o referencial teórico e tecnológico que embasa o projeto. Primeiramente expõe

um estudo sobre o desbalanceamento em redes IEEE 802.11, destacando as características mais importantes dessas redes e as propostas existentes na literatura para o problema de desbalanceamento. Em seguida descreve os outros dois métodos de associação propostos, balanceamento dinâmico de carga e balanceamento de carga utilizando virtualização;

- Capítulo 3 – Desenvolvimento do Projeto – O capítulo relata a topologia e a visão do projeto. Além de especificar hardware e software utilizados no ambiente de simulação;
- Capítulo 4 – Testes e Resultados - Nesse capítulo os resultados das simulações e as comparações entre os diferentes métodos de associação em redes IEEE 802.11 são apresentados e analisados;
- Capítulo 5 – Conclusão – Esse capítulo traz as conclusões obtidas e apresenta propostas para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2 - REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 – Redes IEEE 802.11

2.1.1 – Padrões IEEE

Em 1985, a *Computer Society* do IEEE iniciou um projeto, denominado Projeto 802, com a finalidade de estabelecer padrões que permitissem a intercomunicação entre equipamentos de uma série de fabricantes. O modelo de referência de interconexão de sistemas abertos (OSI), que dominou a literatura sobre comunicação de dados antes da década de 1990, foi usado como paradigma para o projeto.

O modelo OSI é uma estrutura em camadas para o projeto de sistemas de redes que permitem a comunicação entre todos os tipos de sistemas de computadores. Ele é formado por sete camadas distintas. Cada camada realiza uma, ou algumas, das funções nos processos de comunicação. A figura 2.1 ilustra esse modelo. Como pode ser observado, o mesmo modelo se aplica à fonte e ao destino da informação, sendo que as camadas formam pares. A única conexão física entre as diferentes camadas ocorre na camada física. Para cada uma das camadas restantes, existe uma conexão virtual entre pares (HAYKIN, MOHER, 2008).

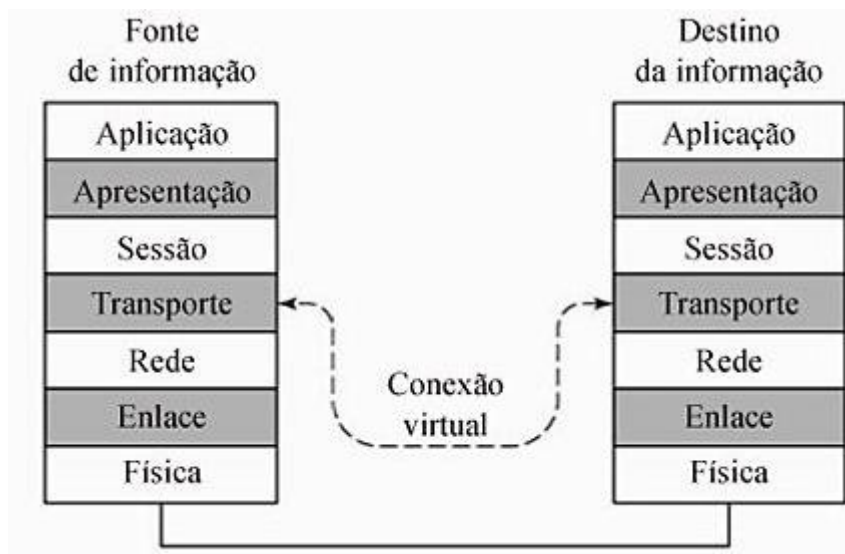


Figura 2.1: As sete camadas do modelo OSI

Fonte: (HAYKIN, MOHER, 2008)

O padrão IEEE 802 foi adotado pela ANSI (*American National Standards Institute*) e aprovado pela ISO (*International Organization for Standardization*) com a denominação de ISO 8802.

A relação do padrão 802 com o modelo OSI tradicional é ilustrada na Figura 2.2. O IEEE especificou funções conjuntas de camada física e camada de enlace para os principais protocolos de redes LAN (*Local Area Network*). A camada de enlace foi subdividida em duas subcamadas, LLC (*Logical Link Control*) e MAC (*Media Access Control*), e vários padrões de camada física foram criados para diversos protocolos LAN (HAYKIN, MOHER, 2008).

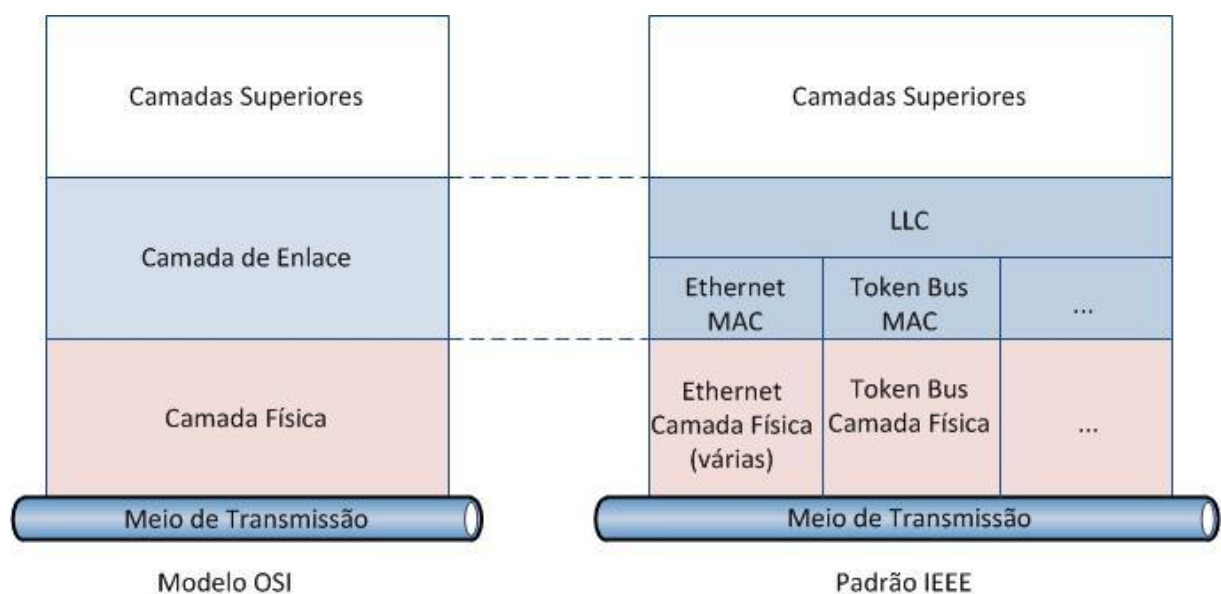


Figura 2.2: Relação do padrão IEEE com o Modelo OSI

Adaptado de: (FOROUZAN, 2008)

O IEEE definiu as especificações para a implementação de redes LAN sem fio (WLAN – *Wireless Local Area Network*), sob a recomendação IEEE 802.11.

2.1.2 – Modos de Operação

Redes do padrão IEEE 802.11 possuem basicamente dois modos de operação: *ad hoc* e infraestruturado. As redes operando no modo *ad hoc* são também chamadas de IBSS (*Independent Basic Service Set*). Uma WLAN *ad hoc* não possui administração centralizada e, por isso, tem alcance limitado. Toda a comunicação dentro de uma rede *ad hoc* é realizada de

maneira direta. Logo, se a estação A deseja se comunicar com a estação B, ela envia seus quadros diretamente ao destino B (Figura 2.3(a)). Se a estação B estiver dentro do alcance de transmissão da estação A, ela receberá diretamente os quadros a ela enviados. Caso contrário, os quadros destinados à estação B precisarão ser encaminhados por estações intermediárias (Figura 2.3(b)). Este tipo de comunicação também é denominado comunicação de múltiplos saltos (SILVA, 2006).

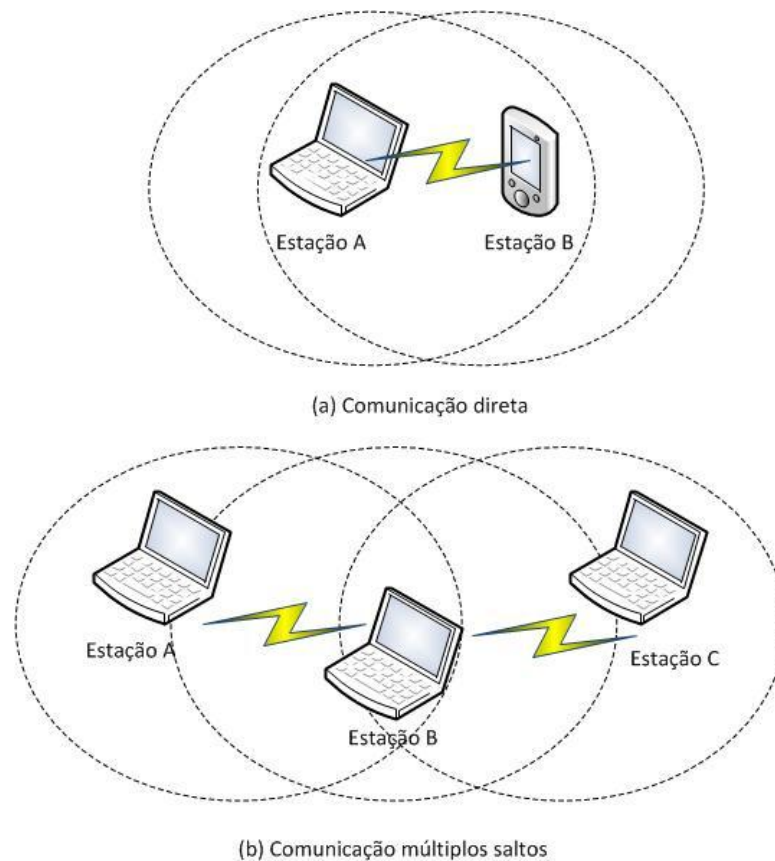


Figura 2.3: Redes *ad hoc*

Adaptado de: (SILVA, 2006)

Por outro lado, no modo de operação infraestruturado toda a comunicação entre estações móveis, ou entre estações móveis e estações na rede cabeada, é coordenada por uma estação-base central conhecida como AP (*Access Point*). O AP é responsável por encaminhar os quadros de suas estações clientes para os destinos internos e externos à rede 802.11 (FOROUZAN, 2008). A figura 2.4 apresenta um exemplo de rede sem fio operando no modo infraestruturado. Neste exemplo, se a estação A deseja se comunicar com a estação C, primeiro ela envia os quadros para o AP, que encaminha os mesmos para a estação C. Neste modo de operação, as redes 802.11 formam células, que também são denominadas BSSs

(*Basic Service Sets*), e cada uma delas opera de maneira independente em um canal fixo e único. A junção de duas ou mais BSSs com APs forma uma ESSs (*Extend Service Set*). Nesse caso, as BSSs são conectadas por meio de um sistema de distribuição, que pode ser qualquer tipo de rede LAN padrão IEEE. A figura 2.5 mostra um exemplo de ESS.

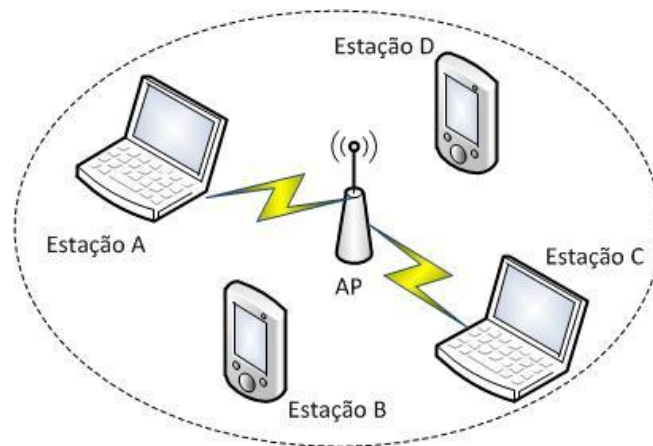


Figura 2.4: Rede IEEE 802.11 infraestruturada

Adaptado de: (SILVA, 2006)

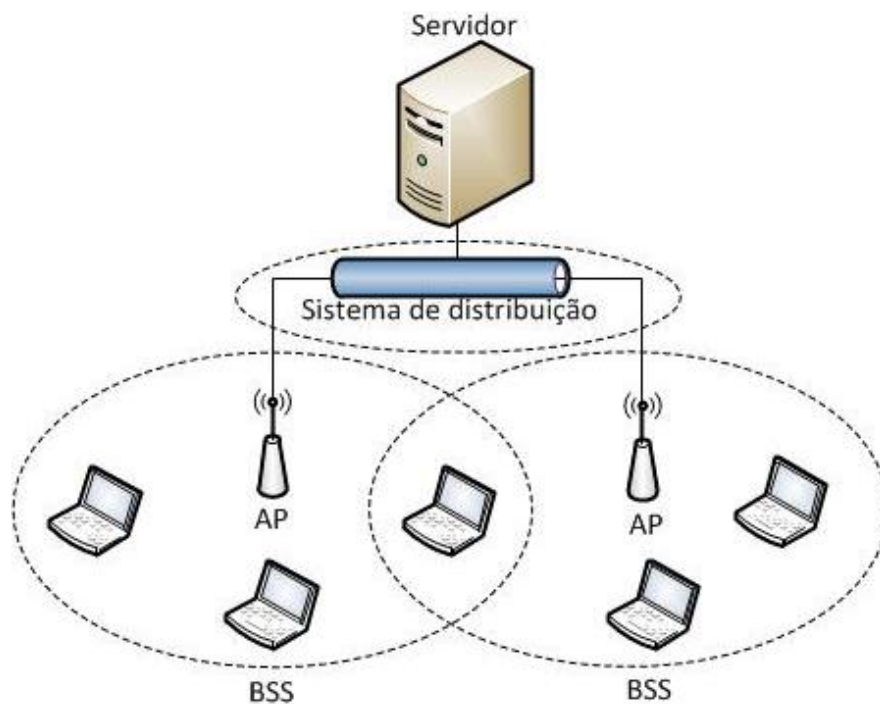


Figura 2.5: *Extended Service Set*

Adaptado de: (FOROUZAN, 2008)

Por requerer menos esforço e conhecimento técnico por parte dos usuários para a sua utilização e por servir de ponte de acesso a redes externas, o modo de operação infraestruturado é o mais difundido e utilizado em aplicações de redes 802.11.

2.1.3 – Tipos de Estação

O padrão IEEE 802.11 define três tipos de transição que descrevem a mobilidade da estação em uma rede WLAN: sem transição, transição inter-BSS e transição inter-ESS.

Uma estação do tipo sem transição não pode se movimentar ou pode se movimentar apenas dentro da BSS. Uma estação com mobilidade de transição inter-BSS pode se movimentar de uma BSS a outra, mas essa movimentação fica limitada ao interior de um mesmo ESS. Uma estação com mobilidade de transição inter-ESS pode se movimentar de um ESS para outro. No entanto, o padrão IEEE 802.11 não assegura que a comunicação será transparente durante a transição entre ESSs (FOROUZAN, 2008).

2.1.4 – Camada Física

Através da utilização de portadoras de rádio ou infravermelho, as WLANs estabelecem comunicação. Os dados são modulados na portadora de rádio e transmitidos através de ondas eletromagnéticas. De acordo com o padrão IEEE 802.11, o canal utilizado pelos dispositivos de uma mesma rede é fixo e único. A norma 802.11 possui extensões que definem que faixas de frequência podem ser utilizadas e que diferentes tipos de esquema de modulação e codificação podem ser empregados.

A Figura 2.6 apresenta diferentes extensões definidas pela norma 802.11 (IEEE 802.11, 2007). A extensão 802.11a utiliza o método ortogonal de multiplexação por divisão de frequência OFDM (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*) para a geração de sinais na faixa de frequências de 5 GHz. As velocidades típicas para transmissão de dados são 18 e 54 Mbps. Já as extensões b e g da norma 802.11 coordenam o operação dos dispositivos na faixa de frequências de 2,4 GHz, fornecendo taxas de transmissão de até 11 Mbps no caso do 802.11b e 54 Mbps no caso do 802.11g. Tem-se também a nova especificação 802.11n, que é uma emenda ao padrão IEEE 802.11-2007 para melhorar o rendimento da rede. Esta especificação inclui uma nova tecnologia que permite transmissão e recepção de dados por

múltiplas antenas (MIMO – *Multiple input, Multiple output*) e canais com maior largura de banda (FOROUZAN, 2008).

IEEE	Técnica	Banda	Velocidade (Mbps)
802.11	FHSS	2,4 GHz	1 e 2
	DSSS	2,4 GHz	1 e 2
		Infravermelho	1 e 2
802.11a	OFDM	5,725 GHz	6 a 54
802.11b	DSSS	2,4 GHz	5,5 e 11
802.11g	OFDM	2,4 GHz	22 e 54
802.11n	OFDM	2,4 e/ou 5,725 GHz	65 a 600

Figura 2.6: Camadas físicas

Todas as implementações, exceto o infravermelho, operam na faixa de frequências ISM (*Industry, Scientific and Medical Band*). Esta banda de frequência é conhecida como não licenciada, ou seja, nela não é necessário que os dispositivos possuam uma licença para a operação. Eles devem apenas atender a algumas restrições de largura de banda e potência de transmissão.

2.1.5 – Camada de Enlace

As duas principais funções da camada de enlace de dados são o controle do enlace de dados e o controle de acesso ao meio de transmissão. O IEEE subdividiu a camada de enlace em duas subcamadas e atribuiu estas funções a cada uma. A primeira delas, a subcamada LLC, é responsável pelos controles de fluxo e erros, ou seja, busca comunicação confiável de um nó a outro. A segunda, a subcamada MAC, é responsável pelo controle de acesso ao meio de transmissão, ou seja, define como um enlace físico de dados será compartilhado (IEEE 802.11, 1999).

2.1.5.1 – Problemas com Estações Ocultas e Expostas

Devido à complexidade inerente do ambiente sem fio, o protocolo da subcamada MAC do padrão 802.11 é bastante diferente. Para começar, existem os problemas da estação

oculta e exposta. A figura 2.7 exemplifica o problema da estação oculta. Levando em consideração que nem todas as estações estão dentro do alcance de rádio uma das outras, as transmissões realizadas em uma parte de uma célula podem não ser recebidas em outros lugares na mesma célula. Nesse exemplo, a estação C está transmitindo para a estação B. Se A quer enviar para B e escuta o canal, não ouvirá nada e concluirá erroneamente que pode iniciar a transmissão para B. Estações ocultas reduzem a capacidade de transmissão da rede em decorrência do aumento de colisões (TANEMBAUM, 2003).



Figura 2.7: O problema da estação oculta

Adaptado de: (TANEMBAUM, 2003)

Além disso, existe o problema inverso, o problema da estação exposta, ilustrado na figura 2.8. Nesse caso, B quer transmitir para C, e portanto escuta o canal. A estação B consegue ouvir a transmissão de A e conclui, erroneamente, que não pode transmitir para C, embora A talvez esteja transmitindo para uma outra estação. O problema de estações expostas faz com que a capacidade do canal seja desperdiçada (TANEMBAUM, 2003).

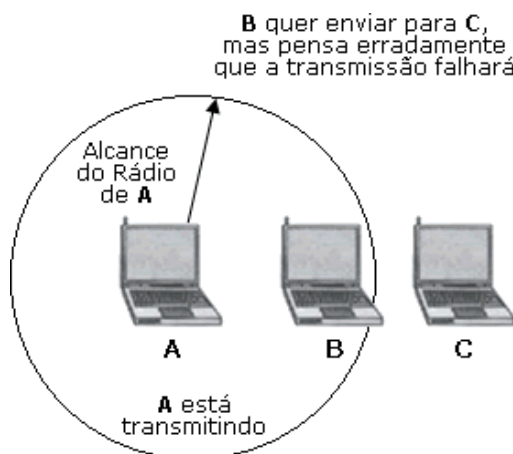


Figura 2.8: O problema da estação exposta

Adaptado de: (TANEMBAUM, 2003)

2.1.5.2 – Subcamada MAC

Para lidar com os problemas de estações ocultas e expostas, o 802.11 admite dois modos de operação. Um deles, chamado DCF (*Distributed Coordination Function*), não usa nenhuma espécie de controle central e deve ser aceito por todas as implementações. O outro, chamado PCF (*Point Coordination Function*), é um método de acesso opcional que utiliza a estação-base para controlar toda a atividade em sua célula. Ele é implementado sobre o DCF e usado, em grande parte, para transmissão de dados sensíveis a atrasos (TANEMBAUM, 2003). A figura 2.9 mostra a relação entre as duas subcamadas MAC, a subcamada LLC e a camada física.

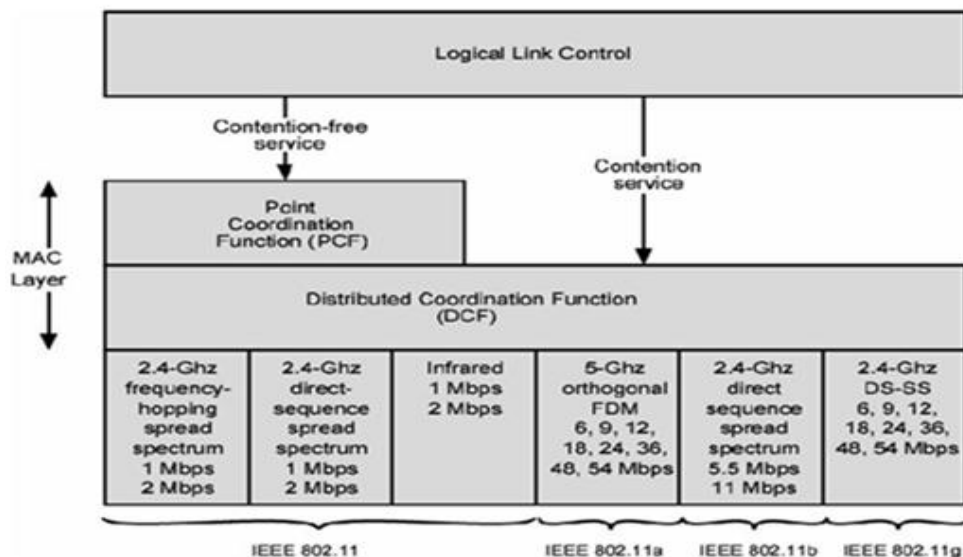


Figura 2.9: Subcamadas MAC no padrão IEEE 802.11

Fonte: (FOROUZAN, 2008)

Quando se emprega o modo DCF, as redes 802.11 utilizam o método de acesso ao meio CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*). De acordo com o CSMA/CA, sempre que uma estação 802.11 deseja transmitir um quadro, ela primeiro precisa “escutar” o meio de transmissão à procura de outras transmissões. Se o meio permanecer livre durante um intervalo de tempo predeterminado (DIFS – *Distributed Inter-Frame Space*), ela inicia a transmissão do seu quadro em espera. Se durante o intervalo em que a estação passou ouvindo o meio, ela detectar alguma outra transmissão, a estação deve esperar o seu término

antes de iniciar a sua transmissão. Além disso, uma vez que outra transmissão é detectada antes da transmissão de um quadro, a estação deve esperar além de DIFS, um intervalo de tempo sorteado aleatoriamente para evitar colisões. O método CSMA/CA foi desenvolvido basicamente para redes sem fio, que não tem energia suficiente para detectar colisões (FOROUZAN, 2008).

2.1.6 – IEEE 802.11e

O padrão IEEE 802.11e foi desenvolvido para suportar serviços de QoS através da introdução de mecanismos de diferenciação de tráfego, onde, de acordo com o tipo de tráfego e seus requisitos, são definidas diferentes prioridades para transmissão. O desenvolvimento deste padrão foi motivado devido às limitações dos mecanismos de controle de acesso ao meio do padrão IEEE 802.11 em prover QoS (IEEE 802.11, 2007).

Assim, o IEEE 802.11e define uma nova função de controle de acesso ao meio, denominada HCF (*Hybrid Coordination Function*). Esta é uma função centralizada que combina aspectos da DCF e PCF com melhoramentos nos mecanismos de QoS para prover diferenciação de serviço, definindo dois métodos de acesso ao meio sendo um baseado em contenção e outro controlado. O mecanismo de acesso ao meio baseado em contenção é o EDCA (*Enhanced Distributed Channel Access*), que consiste no aprimoramento da DCF, e o acesso controlado ao meio é o HCCA (*HCF Controlled Channel Access*), que consiste no aprimoramento da PCF. A coordenação destes dois mecanismos é realizada através do coordenador híbrido HC (*Hybrid Coordinator*), localizado no ponto de acesso. A figura 2.10 ilustra a arquitetura da subcamada MAC IEEE 802.11e (IEEE 802.11, 2007).

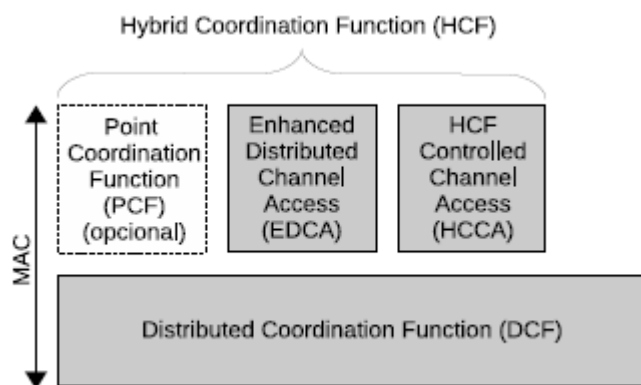


Figura 2.10: Subcamadas MAC no padrão IEEE 802.11e

Adaptado de: (IEEE 802.11, 2007)

O HCF introduz o conceito de oportunidade de transmissão TXOP (*Transmission Opportunity*), definido como um intervalo no qual a estação tem direito de transmitir os seus pacotes. Este intervalo possui um limite máximo (*TXOPLimit*) que é definido de acordo com o tipo de mecanismo em uso. O uso desse conceito visa resolver os problemas de tempos de transmissão e atrasos imprevisíveis presentes no padrão IEEE 802.11 (DEMARCH, 2007).

2.1.7 – Associação

De acordo com o padrão IEEE 802.11, o processo de associação consiste em três fases. Na primeira fase, estações não associadas fazem uma varredura do canal para “ouvir” *frames* de aviso que são periodicamente transmitidos pelos APs. Esse processo é chamado de varredura passiva. Alternativamente, uma estação pode escolher uma abordagem ativa e enviar *frames* de requisição (*Probe Request*). Os APs disponíveis respondem com *frames* de resposta (*Probe Response*). Esta troca de quadros permite que as estações obtenham informações básicas sobre as células, como potência do sinal, modos de transmissão disponíveis e criptografia. Na segunda fase, a estação determina o AP mais adequado para se associar. Finalmente, na terceira fase, a estação envia um *frame* de solicitação de associação para o AP selecionado. O AP responde com um *frame* de resposta e o processo de autenticação é iniciado. Se a autenticação for bem sucedida, a estação passa a fazer parte da rede e tem autorização para transmissão de dados (IEEE 802.11, 1999).

A política de associação sugerida pelo padrão IEEE 802.11 é baseada na relação sinal-ruído. Ou seja, na segunda fase, o ponto de acesso com a maior potência do sinal será o escolhido. Como o nome indica, esta relação estabelece a diferença entre o nível de sinal recebido e o ruído presente no canal utilizado. A relação é dada em decibel (dB) e valores maiores indicam maior possibilidade do enlace ser mantido.

Por utilizar apenas a relação sinal-ruído, a abordagem tradicional ficou conhecida por deixar as redes com baixo desempenho. Como as estações não são uniformemente distribuídas, alguns APs recebem cargas pesadas enquanto outros recebem cargas leves ou ficam ociosos. Alguns trabalhos (SHEU, WU, 1999; BALACHANDRAN et al., 2002; BEJERANO et al., 2004; RAMINE, SAVAGE, 2005; ATHANASIOU et al., 2007) discutem o desbalanceamento em redes IEEE 802.11 e mostram a alocação desigual de largura de banda entre as estações.

2.2 – Balanceamento Dinâmico de Carga

O padrão IEEE 802.11, por apenas utilizar a relação sinal-ruído, não possibilita nenhuma maneira de aplicar balanceamento de carga. As estações ignoram as condições de carga e não utilizam nenhuma métrica especial. Por conta disso, dependendo do ambiente, grande parte das estações podem associar-se apenas a um AP. A figura 2.11 mostra um exemplo de WLAN onde a carga entre os APs não é distribuída de maneira uniforme. Neste cenário, a WLAN é formada por quatro pontos de acesso e doze estações. Por simplicidade, o valor da relação sinal-ruído é proporcional à distância entre o AP e a estação e a carga de tráfego é constante. Há oito estações associadas ao AP_a e quatro estações associadas ao AP_c . Como um resultado, pode-se dizer que a banda compartilhada pelas estações não é igual e que a carga entre os APs está desequilibrada. Neste exemplo, a vazão da rede é prejudicada e só metade da capacidade da rede é utilizada. Uma atribuição melhor para as estações é mostrada na figura 2.12. Neste caso, cada AP é responsável por três estações igualmente (SHEU, WU, 1999).

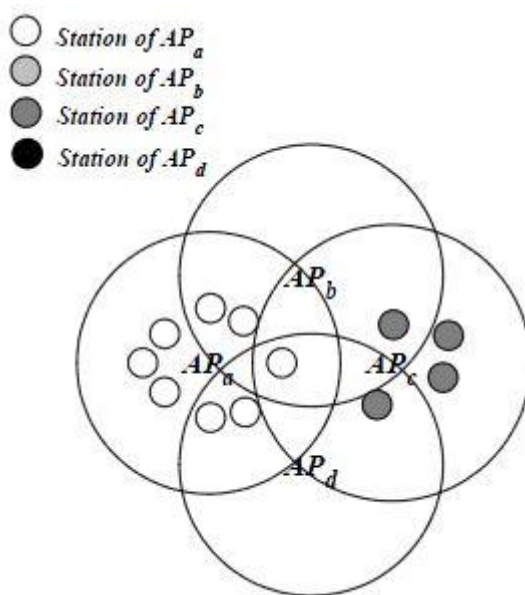


Figura 2.11: Exemplo de associação tradicional

Fonte: (SHEU, WU, 1999)

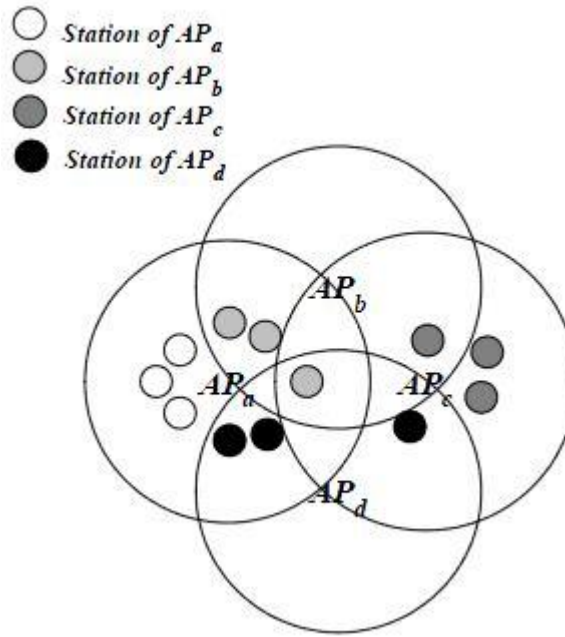


Figura 2.12: Exemplo de associação com balanceamento de carga

Fonte: (SHEU, WU, 1999)

Na literatura, há métricas que se baseiam em uma relação entre o sinal-ruído e a quantidade de estações associadas ao AP (SHEU, WU, 1999; PAPANIKOS, LOGOTHETIS, 2001; BEJERANO et al., 2004; VILLEGAS et al., 2008). O algoritmo de (SHEU, WU, 1999) foi o primeiro a tratar do balanceamento dinâmico de carga em redes IEEE 802.11. O foco desse algoritmo é distribuir melhor as estações entre os APs da rede.

2.2.1 – Algoritmo DLBA

O algoritmo DLBA (SHEU, WU, 1999) utiliza como métrica a relação sinal-ruído e a quantidade de estações associadas ao AP. A estação define em qual AP irá se conectar utilizando a comparação descrita pela relação definida nas equações 2.1 e 2.2, onde: $E_x(y)$ é a SINR do AP_x em relação a uma estação y ; ME_x é a média das SINRs das estações associadas ao AP_x; e SN_x é o número de estações conectadas ao AP_x.

$$\begin{cases} \text{se } E_x(y) > ME_x, & \text{a contribuição da nova estação é positiva;} \\ \text{caso contrário } E_x(y) \leq ME_x, & \text{a contribuição da nova estação é negativa.} \end{cases} \quad \text{Eq. (2.1)}$$

$$ME_x = \frac{\sum (\text{SINR das estações associadas}) + E_x(y)}{(SN_x + 1)}. \quad \text{Eq. (2.2)}$$

A diferença entre $E_x(y)$ e ME_x é um valor de referência importante no algoritmo DLBA. Se $E_x(y)$ for maior que ME_x , a nova estação terá uma contribuição positiva. Caso contrário, se $E_x(y)$ for menor ou igual a ME_x , a estação terá uma contribuição negativa degradando o SINR médio. Portanto, conforme definido na equação 2.3, $D_x(y)$ representa a diferença da SINR do AP_x em relação à estação y com a média das SINRs das estações associadas ao AP_x .

$$D_x(y) = E_x(y) - ME_x. \quad \text{Eq. (2.3)}$$

Visando a garantia de uma boa distribuição das estações entre os APs, o algoritmo DLBA faz o recálculo do valor de $D_x(y)$. O recálculo é feito apenas pelas estações que estão associadas ao AP que recebe um novo associado. Após o recálculo, caso o valor de $D_x(y)$ represente uma contribuição negativa para o AP_x , um contador chamado de HC (*Hold Counter*) é incrementado. Caso contrário, nada é feito, ou seja, a estação possui uma contribuição positiva para o AP. Quando o contador HC de uma estação atinge um limiar chamado de MH (*Max Hold Counter*), essa estação precisa fazer uma nova varredura a procura de um AP melhor. A equação 2.4 representa esse processo (CARDOSO et al., 2009).

$$\begin{cases} \text{se } HC \geq MH, & \text{nova varredura;} \\ \text{caso contrário } HC < MH, & \text{continua no mesmo AP.} \end{cases} \quad \text{Eq. (2.4)}$$

Para evitar que uma estação, ao fazer uma nova varredura, escolha um AP pior, o algoritmo DLBA inclui o cálculo de pesos. Quando uma estação quer participar de uma WLAN, ela calcula o peso de todos os APs disponíveis para encontrar o melhor AP de peso máximo. Dessa forma, a escolha do AP está levando em consideração a influência da estação em relação a cada AP e a qualidade do sinal. A equação 2.5 define o cálculo dos pesos, onde: $W_x(y)$ é o resultado do peso associado e $SINR_{max}$ é o sinal-ruído máximo de um AP_x (SHEU, WU, 1999).

$$\begin{cases} D_x(y) > 0, & W_x(y) = D_x(y) \times \left(1 + \frac{ME_x}{SINR_{max}}\right); \\ D_x(y) \leq 0, & W_x(y) = D_x(y) \times \left(1 - \frac{ME_x}{SINR_{max}}\right). \end{cases} \quad \text{Eq. (2.5)}$$

O algoritmo DLBA quebra o padrão IEEE 802.11 para poder receber as informações de $E_x(y)$ e o somatório das SINRs das estações associadas. Essas informações são incluídas no pacote de resposta que um AP envia a uma estação no processo de varredura.

2.3 – Balanceamento de Carga Utilizando Virtualização

A principal ideia da virtualização é disponibilizar para um único substrato a possibilidade de executar múltiplos experimentos virtuais de maneira eficiente. Por conta da dinamicidade do ambiente, na virtualização de redes sem fio são apresentados desafios únicos não observados em redes cabeadas.

Nos últimos anos, a virtualização tem sido bastante abordada na literatura. Houve inúmeras contribuições em diversas áreas de pesquisa. O processo de *handoff* em redes sem fio foi abordado em (RAMINE, SAVAGE, 2005). Um estudo onde a virtualização de interfaces em redes sem fio é gerenciada por um *driver* chamado de *Virtual WiFi* foi realizado por (CHANDRA, 2006). Tem-se também estudos feitos em *testbeds*, onde esquemas de virtualização por divisão no tempo e no espaço foram testados (MAHINDRA et al., 2008) e avaliações de desempenho de redes virtualizadas com divisão no tempo foram realizadas (SMITH et al., 2007).

O método de associação comparado neste trabalho busca definir um esquema de virtualização para balancear a carga de uma estação entre múltiplas interfaces virtualizadas (CARDOSO et al., 2009).

2.3.1 – Virtualização de Redes IEEE 802.11

A virtualização de uma interface física IEEE 802.11 permite a associação de uma estação cliente a múltiplos APs simultaneamente (CARDOSO et al., 2009). O enlace sem fio pode ser virtualizado seguindo várias técnicas (PAUL, SESHAN, 2006), as mais comuns são:

- FDMA (*Frequency Division Multiple Access*): A virtualização do substrato é feita através da divisão de frequências. Ou faz-se a troca de canais em um único dispositivo físico, ou utiliza-se múltiplos dispositivos físicos em diferentes canais. A figura 2.13 mostra um exemplo de FDMA, onde um nó 802.11a com 12 frequências ortogonais pode ser logicamente particionado em 4 nós virtuais através da atribuição de 3 frequências por nó virtual;
- TDMA (*Time Division Multiple Access*): A virtualização do substrato é feita através da divisão do tempo. Ou seja, diferentes experimentos utilizam uma dada frequência do substrato em diferentes “fatias” (*slots*) de tempo. A figura 2.14 mostra um exemplo de

TDMA, onde um nó 802.11a pode ser logicamente particionado em 3 nós virtuais através da atribuição de 3 fatias de tempo para três experimentos;

- TDMA combinado com FDMA: Um substrato pode ser virtualizado permitindo que diferentes experimentos utilizem uma dada frequência particionada em diferentes fatias de tempo. Assim, um nó virtual é identificado por uma única combinação de frequência particionada e fatia de tempo. A figura 2.15 mostra um exemplo de TDMA combinado com FDMA, onde um nó 802.11a com 12 frequências ortogonais pode ser logicamente particionado em 4 grupos lógicos através da atribuição de 3 frequências por grupo, que ainda pode ser dividido em múltiplas fatias de tempo;
- FH (*Frequency Hopping*): Técnica de virtualização semelhante ao TDMA combinado com FDMA. A figura 2.16 mostra um exemplo de FH, onde um nó 802.11a com 12 frequências ortogonais pode ser logicamente particionado em 4 grupos lógicos através da atribuição de 3 frequências por grupo, que ainda pode ser dividido em múltiplas fatias de tempo. No entanto, ao contrário do TDMA combinado com FDMA, o mesmo usuário poderá utilizar diferentes sequências de frequência e tempo;
- CDMA (*Code Division Multiple Access*): A virtualização do substrato é feita através de códigos. Essa técnica faz a troca de códigos dentro de um experimento para emular múltiplos experimentos virtuais.

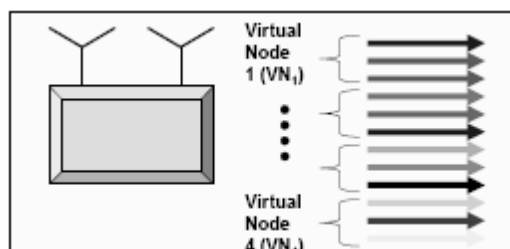


Figura 2.13: Exemplo de virtualização baseada em FDMA

Fonte: (PAUL, SESHAN, 2006)

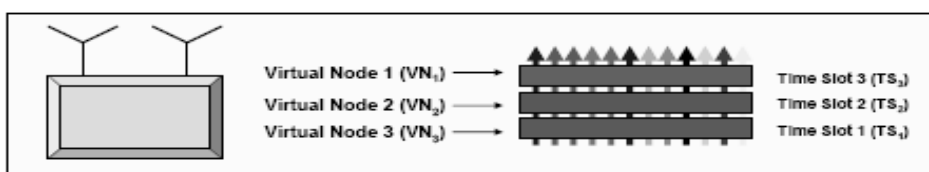


Figura 2.14: Exemplo de virtualização baseada em TDMA

Fonte: (PAUL, SESHAN, 2006)

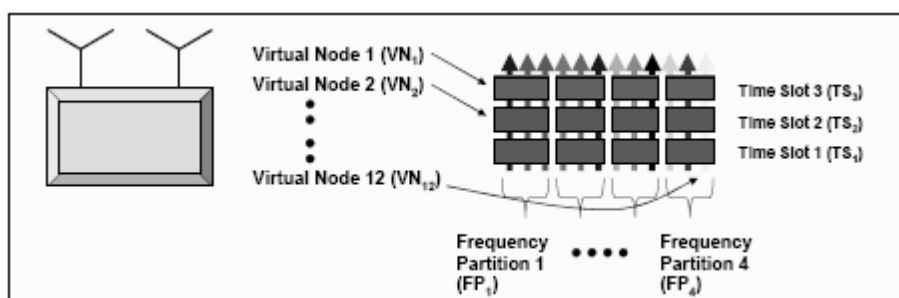


Figura 2.15: Exemplo de virtualização baseada em TDMA combinado com FDMA

Fonte: (PAUL, SESHAN, 2006)

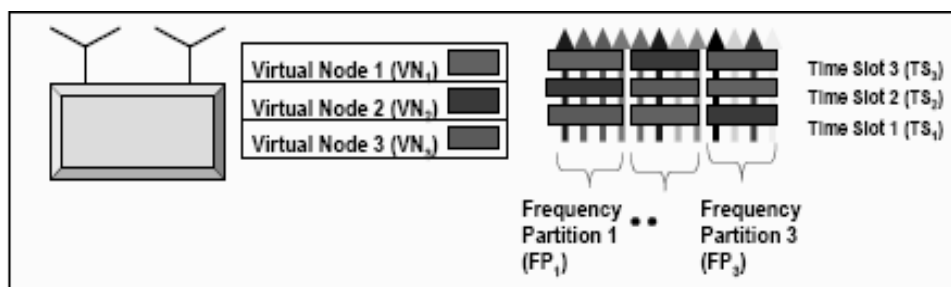


Figura 2.16: Exemplo de virtualização baseada em FH

Fonte: (PAUL, SESHAN, 2006)

Por ser uma versão dinâmica da técnica TDMA combinado com FDMA, a proposta de (CARDOSO et al., 2009) utiliza a técnica de virtualização FH.

2.3.2 – Padrão IEEE 802.11k

A extensão k do padrão IEEE 802.11 padroniza diversos tipos de medições de características dos canais e do rádio 802.11 (IEEE 802.11k, 2008). Além disso, ela também especifica mensagens utilizadas para a troca dessas informações entre os nós 802.11. Os principais objetivos da extensão 802.11k são (SILVA, 2006):

- Permitir que as estações realizem medições de parâmetros específicos dos canais e do rádio 802.11;
- Padronizar as mensagens para a troca das informações obtidas com as medições, definindo mensagens de requisição e de relatório para cada parâmetro que pode ser medido;

- Disponibilizar o acesso a estas informações para as camadas superiores da pilha de protocolos, fornecendo ferramentas para o desenvolvimento de novas aplicações e mecanismos.

No padrão IEEE 802.11k, medições não são feitas apenas de forma local, podendo estender a possibilidade de solicitar medições das estações vizinhas. As medições dos parâmetros do rádio em redes sem fio ajuda às aplicações a se adaptarem automaticamente ao ambiente dinâmico do rádio. Os quadros de relatórios *Neighbor Report*, *Channel Load Report* e *STA Statistics* são exemplos de quadros do padrão 802.11k (CARDOSO et al., 2009).

Para implementação do algoritmo de balanceamento de carga utilizando virtualização, uma métrica para determinação as sequências do esquema de virtualização FH foi necessária. A métrica proposta pelos autores foi baseada na ocupação do meio pelos APs e na quantidade de estações associadas a eles. Todas essas medidas foram implementadas no padrão IEEE 802.11k e adquiridas por troca de mensagens (CARDOSO et al., 2009).

2.3.3 – IAPP

O processo de *handoff* ocorre quando uma estação se move para além do alcance de um AP e entra em outra BSS. Basicamente, *handoff* é uma função de entrega da camada física desempenhada por pelo menos três entidades participantes: estação, AP atual e AP posterior (MISHRA et al., 2003). Este processo motivou a criação do protocolo IAPP (*Inter-Access Point Protocol*), que foi definido como a extensão f do padrão IEEE 802.11.

O protocolo IAPP define como os pontos de acesso se comunicarão através do *backbone* da rede, controlando os dados de várias estações móveis. Uma estação cliente ao trocar de AP em um processo de *handoff* com o IAPP, solicita uma reassociação para o novo AP, e o IAPP se incumbem de trocar a tabela de encaminhamento dos *switches* e/ou roteadores da rede. O mecanismo de reassociação do IAPP é disparado por um quadro do tipo *MLME-REASSOCIATE.indication* (MLME – *MAC Layer Management Entity*), e uma sequência de quadros do tipo *IAPP-MOVE* é utilizada para fazer a reassociação. Os quadros *IAPP-MOVE* utilizados para fazer a reassociação são (CARDOSO et al., 2009):

- *IAPP-MOVE.request*: Este quadro, ao ser ativado pelo recebimento de um quadro *MLME-REASSOCIATE.indication* de uma estação cliente, enviará um quadro *IAPP-MOVE.notify* ao AP que a estação estava previamente associada, indicando que essa está sendo reassociada a um novo AP. Além disso, será enviado um quadro *IAPP Layer 2 Update*

para os *switches*/roteadores atualizarem as tabelas de encaminhamento do novo AP para a estação;

- *IAPP-MOVE.indication*: Este quadro é utilizado para indicar que uma estação cliente foi reassociada com outro AP;
- *IAPP-MOVE.response*: Este quadro envia qualquer informação que seja importante na definição dos padrões IEEE 802.11;
- *IAPP-MOVE.confirm*: Este quadro é utilizado para confirmar a ação iniciada pelo quadro *IAPP-MOVE.request*.

O IAPP é utilizado no algoritmo de balanceamento de carga utilizando virtualização para permitir a troca de APs entre as interfaces virtualizadas.

2.3.4 – Algoritmo Balanceamento de Carga Utilizando Virtualização

O mecanismo proposto por (CARDOSO et al., 2009) utiliza um processo de escalonamento no tempo com saltos em frequência. Esse mecanismo é realizado pelas estações cliente, entre as suas diversas interfaces virtuais. O processo de escalonamento é realimentado conforme o número de estações cliente associadas ao AP e as medições de ocupação do canal realizadas por ele. Essas medições são coletadas pelas estações cliente em determinados instantes de tempo e utilizadas no algoritmo de escalonamento.

A virtualização das interfaces de rede é feita em um intervalo de tempo ponderado pela quantidade de estações associadas ao AP e pelo valor da ocupação do meio. Como a estação fica apenas uma vez em cada interface virtualizada por ciclo, a soma dos pesos em que cada interface permanece ativa, em cada ciclo, é igual a 1. Isso pode ser observado na equação 2.6, onde n é a quantidade de interfaces virtualizadas e $P(AP_i)$ são os pesos associados a essas interfaces. Como cada interface virtual está associada a um AP, o número de interfaces virtuais de cada estação é referente à quantidade de APs aos quais uma estação pode associar-se (CARDOSO et al., 2009).

$$\sum_{i=1}^n P(AP_i) = 1. \quad Eq. (2.6)$$

No esquema de virtualização FH, a cada ciclo são coletadas medições do padrão IEEE 802.11k, e ao fim, o cálculo dos pesos dos APs para o ciclo seguinte é refeito. As medições são coletadas no final do tempo ativo de cada interface virtualizada e, no mesmo instante é

solicitado que o AP inicie a medição para a coleta do próximo tempo ativo. A figura 2.17 apresenta um diagrama de como os ciclos funcionam. Os rótulos coleta 1 AP_i representam os valores de coletas referentes ao ciclo anterior, que foram solicitados nos instantes representados pelos rótulos coleta 0 AP_i . O rótulo fatia de tempo da figura 2.17 representa a unidade de tempo do ciclo. Cada ciclo possui T fatias de tempo, que representam o tempo ativo de cada interface virtualizada nos APs, ou seja, os tempos ativos das estações em cada AP (CARDOSO et al., 2009).

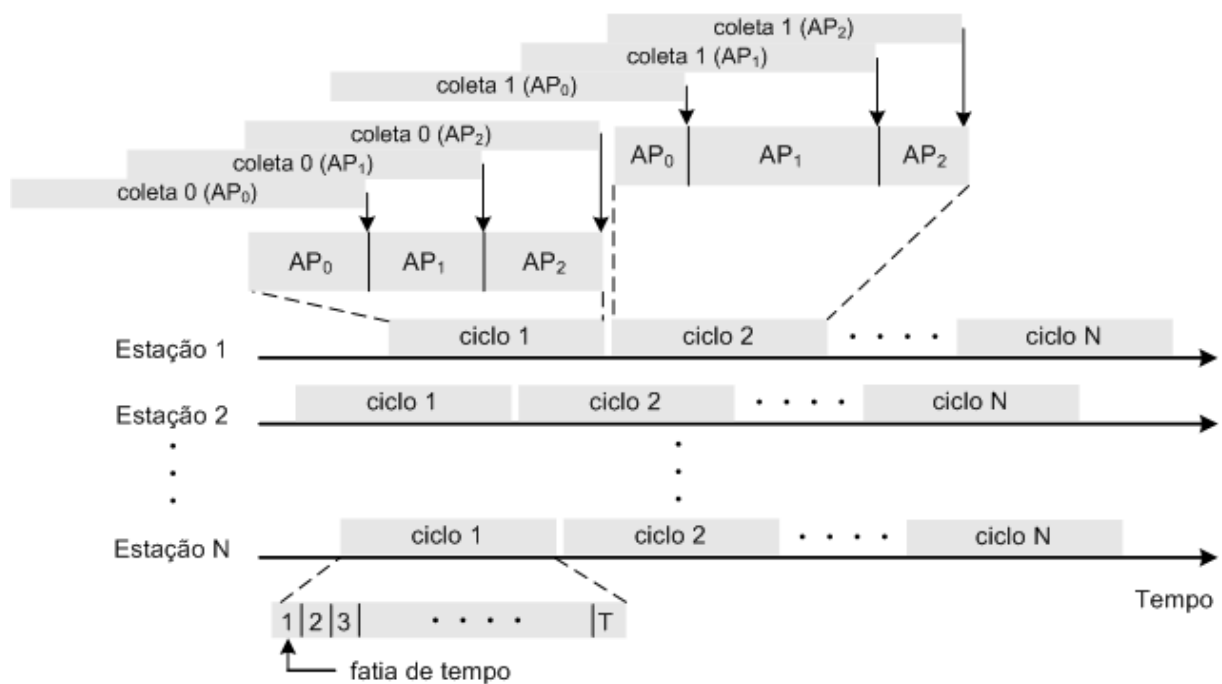


Figura 2.17: Representação do esquema de virtualização FH utilizando fatias de tempo ponderadas para cada AP

Fonte: (CARDOSO et al., 2009)

No algoritmo proposto por (CARDOSO et al., 2009), a comutação entre interfaces virtuais se assemelha ao processo de *handoff*. A figura 2.18 ilustra o processo utilizando o protocolo IAPP. Uma estação cliente, ao comutar para um AP, deve reassociar-se a ele, enviando um quadro do tipo *Reassociate Request*, representado pelo número 1 na Figura 2.18. Após a reassociação do cliente, o novo AP atualiza as tabelas de encaminhamento dos *switches* e/ou roteadores da rede pelo envio do mesmo quadro que foi recebido em *broadcast*, representado pelo número 2 na Figura 2.18. Por fim, o AP envia um quadro de *Reassociate Notify* para o AP antigo da estação e termina o processo de reassociação, representado pelo

número 3 na Figura 2.18. Todo o processo introduz um atraso para que os pacotes possam ser encaminhados ao AP novo e para que a mudança de frequência e resincronização no novo canal sejam realizadas (MISHRA et al., 2003).

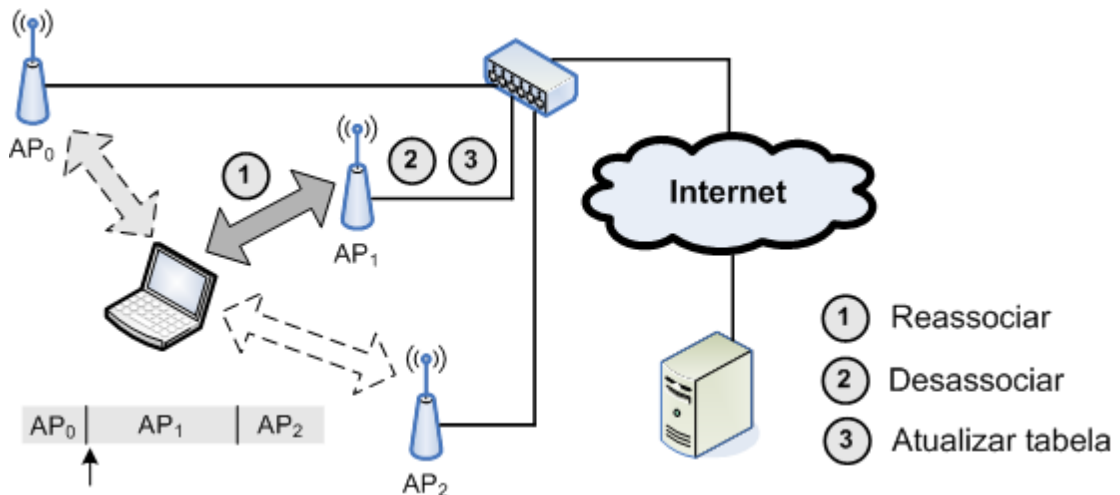


Figura 2.18: Escalonamento entre APs utilizando o protocolo IAPP

Fonte: (CARDOSO et al., 2009)

2.3.4.1 – Suporte do padrão IEEE 802.11k

Como já foi dito, o padrão IEEE 802.11k foi implementado no algoritmo de (CARDOSO et al., 2009) para medições de ocupação do canal e número de estações associadas no AP. O relatório das estatísticas de ocupação do canal é disponibilizado através do quadro *Channel Load Report*. Já o número de associados no AP é disponibilizado pelo quadro *Neighbor Report*.

Para obter a ocupação do canal, o quadro *Channel Load Request* é utilizado para fazer a solicitação ao AP de uma medição em um determinado tempo. A resposta vem em um quadro *Radio Measurement Report* contendo a utilização do canal em porcentagem de ocupação. A equação 2.7 representa a medida, onde OC_x é a ocupação do canal do AP_x , TCO é o tempo que o canal permanece ocupado e TM é o tempo de medição. A equação 2.7 define a porcentagem do tempo de ocupação linearmente escalado com 255 representando 100% (CARDOSO et al., 2009).

$$OC_x = \text{Inteiro} \left(\frac{TCO}{TM \times 1024} \right) \times 255 \quad \text{Eq. (2.7)}$$

Outra medição importante obtida pelo padrão IEEE 802.11k é a quantidade de estações associadas a um determinado AP. Esse valor é requisitado pelo quadro *Neighbor Report Request* e obtido pelo quadro *Neighbor Report Response* (CARDOSO et al., 2009).

O padrão 802.11k também possui um quadro chamado *STA Statistics*, que permite a solicitação de um único relatório com diversas medidas. Sendo assim, é possível obter as medições de ocupação do canal e o número de estações associadas através de um único quadro *STA Statistics*. Os dados são respondidos pelo quadro *Radio Measurement Report* ao final da medição solicitada (CARDOSO et al., 2009).

2.3.4.2 – Algoritmo de Cálculo de Pesos

Como o esquema de virtualização proposto por (CARDOSO et al., 2009) é FH, as estações mudam de canal, e isso ocorre em um intervalo de tempo determinado pelo peso associado aquele tempo ativo. Seguindo a equação 2.6, o cálculo dos pesos é dado pela normalização dos valores da desocupação média. A desocupação média é dada pela equação 2.8, onde $DM_x(y)$ é a desocupação média do AP_x por estação calculada pela estação y , OC_x é o valor da ocupação do canal para o AP_x , mas linearmente escalado com 100, e NS_x é a quantidade de estações associadas ao AP_x . Caso a estação y não pertença ao grupo de estações associadas ao AP_x , o cálculo da desocupação média é realizado com essa estação incluída. O valor da desocupação média é calculado para conseguir uma aproximação da carga do AP por estação associada (CARDOSO et al., 2009).

$$\begin{cases} y \in AP_x, & DM_x(y) = \frac{1 - OC_x}{NS_x}; \\ y \notin AP_x, & DM_x(y) = \frac{1 - OC_x}{NS_x + 1}. \end{cases} \quad \text{Eq. (2.8)}$$

Por fim, os pesos associados para cada tempo ativo entre os APs são calculados pela normalização dessas desocupações médias. A equação 2.9 representa o cálculo dos pesos, onde $P_x(y)$ são os pesos associados aos tempos ativos em cada AP, que é calculado pela normalização dos valores de desocupação média de cada AP ($DM_i(y)$), e N é a quantidade de APs existentes no processo de virtualização da estação y .

$$P_x(y) = \frac{DM_x(y)}{\sum_{i=1}^N DM_i(y)} \quad \text{Eq. (2.9)}$$

A equação Eq. 2.9 está associada a uma melhor aproximação da carga restante do AP por estação associada e procura obter uma medida de desocupação média que leva em conta não somente o percentual de tempo que o AP fica ocupado, mas também o número de estações associadas (CARDOSO et al., 2009).

Neste projeto, a abordagem tradicional (IEEE 802.11, 2007) com o novo padrão de QoS (*Quality of Service*) será simulada e medidas de desempenho em termos de vazão, latência e justiça serão analisadas. Os resultados serão comparados aos apresentados no ambiente proposto por (CARDOSO et al., 2009) para o balanceamento dinâmico de carga e o balanceamento de carga utilizando virtualização.

As técnicas e métodos apresentados neste capítulo servirão de base para o desenvolvimento do ambiente de simulação proposto neste trabalho, conforme apresentado no Capítulo 3.

CAPÍTULO 3 – DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

Este trabalho mostrou que existe um problema de desempenho e igualdade na distribuição de recursos nas redes do padrão IEEE 802.11. Visando este problema, um ambiente de simulação com o novo padrão de QoS (*Quality of Service*) foi proposto e medidas de desempenho em termos de vazão, latência e justiça foram obtidos. Os resultados serão comparados aos apresentados no trabalho realizado por (CARDOSO et al., 2009), onde o balanceamento de carga DLBA e o balanceamento de carga utilizando virtualização são simulados. Tais comparações tem o objetivo de demonstrar em que situações um método é mais vantajoso do que o outro.

Uma das dificuldades encontradas para a criação e a otimização de protocolos de redes é a análise de tais protocolos em diferentes ambientes. A implantação da infraestrutura para testes destas redes se mostraria custosa com o aumento do número de estações tanto do ponto de vista financeiro quanto do ponto de vista do tempo de desenvolvimento. Com base nesses fatos, uma solução com custos reduzidos e que atenda a flexibilidade necessária para os testes é a simulação. Com a utilização do simulador de redes NS-2 (versão 2.34), foi possível a realização de simulações para a avaliação do desempenho do cenário proposto neste trabalho.

A topologia do projeto, as principais características das simulações realizadas, a metodologia empregada na obtenção dos resultados e as implementações realizadas no NS-2 são o escopo deste capítulo.

3.1 – Ambiente de Simulações e Metodologia

Buscando fornecer maior realismo às simulações, os cenários foram reproduzidos com características típicas das redes 802.11. Para realizar esta tarefa, foi utilizada uma topologia semelhante a apresentada na Figura 3.1, com uma rede sem fio infraestruturada. As estações podem se associar a qualquer um dos APs. Os nós, APSs e clientes, foram posicionados dentro de uma área retangular de 300 metros por 400 metros. Cada AP se encontra em um dos três canais ortogonais e nenhum mecanismo de criptografia foi empregado. Além disso, também foi considerado que os APs pertencem ao mesmo BSS. Os experimentos foram feitos com as tecnologias IEEE 802.11b e IEEE 802.11e.

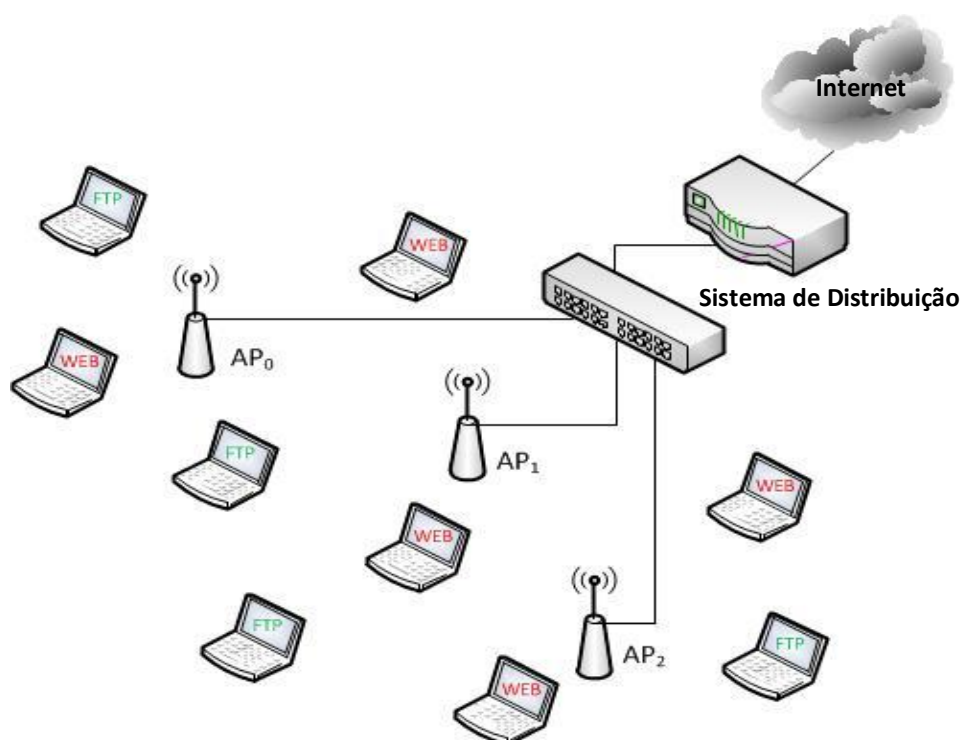


Figura 3.1: Topologia da simulação

Na simulação proposta, há um determinado número fixo de estações recebendo tráfego *web* e é variado o número de estações recebendo tráfego TCP de longa duração, através de uma aplicação FTP (*File Transfer Protocol*). Será avaliado o desempenho das estações que estão utilizando tráfego FTP, chamadas de estações especiais. A simulação do tráfego FTP consistiu da abertura de uma conexão TCP durante toda a simulação entre cada cliente e seu respectivo AP. O tráfego foi gerado no sentido do AP para o cliente representando um *download* de um arquivo grande durante todo o experimento. O objetivo do uso deste tipo de tráfego foi atingir o máximo da capacidade de utilização da rede, já que o protocolo TCP é capaz de atingir toda a capacidade da rede com algumas flutuações.

Foram realizados experimentos para dois tipos de cenários diferentes: com 10 e 30 estações recebendo tráfego *web*. O número de estações recebendo tráfego TCP de longa duração varia de 0 a 30 estações. Além disso, foram realizadas rodadas de 200 segundos e cada configuração foi executada 30 vezes. Para a apresentação dos resultados foi utilizado um intervalo de confiança de 95%.

3.2 – Implementação do projeto

Para o desenvolvimento do ambiente de simulação proposto foram seguidas as seguintes etapas:

1. Instalação da máquina virtual Ubuntu 10.04;
2. Instalação do software NS-2 e aplicação do *patch* `newedcahccaextension.patch`;
3. Implementação do script TCL para simulação;
4. Implementação de código para análise dos arquivos trace obtidos;
5. Geração de gráficos para análise e comparação de resultados;

3.3 – Simulador NS-2

O simulador *The Network Simulator ns-2* (NS-2) é um software *open source* baseado em eventos discretos e utilizado para simulação de redes. O software é resultante de um projeto conhecido como VINT (*Virtual InterNetwork Testbed*), que teve início em 1989. Nos últimos anos, o NS-2 evoluiu substancialmente, sendo o simulador mais popular na comunidade de investigação, utilizado nas principais universidades e institutos de pesquisa (GREIS).

O NS-2 utiliza duas linguagens de programação. Uma delas é a linguagem C++, que é utilizada para programar os módulos responsáveis pela execução dos protocolos ou aplicações. O C++ atende a necessidade de uma linguagem robusta para a manipulação de bytes, processamento de pacotes e implementação de algoritmos. Tem-se também a linguagem OTCL (*Object-oriented Tool Command Language*), que é utilizada para definir de forma rápida as parametrizações dos módulos programados em C++. O OTCL atende a necessidade de tornar a descrição dos modelos mais prática e mais rápida para o usuário (GREIS).

Para que seja possível a utilização dessas duas linguagens, OTCL e C++, existe, no NS-2, uma correspondência entre objetos na interface OTCL e objetos C++. Tendo como objetivo reduzir o tempo de processamento de pacotes e eventos, os componentes básicos de rede são escritos e compilados em C++. Esses objetos compilados são disponibilizados ao interpretador OTCL através de um acoplamento entre a biblioteca OTCL e os componentes compilados em C++. Sendo assim, é criado um objeto correspondente no interpretador OTCL

para cada objeto construído em C++. A figura 3.2 ilustra a correspondência entre as duas linguagens de programação (GREIS).

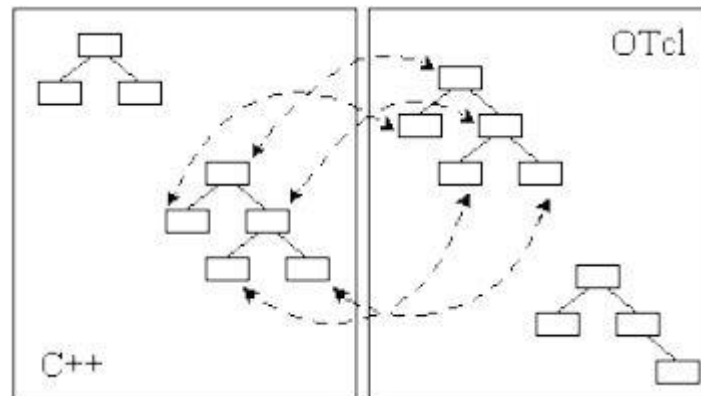


Figura 3.2: Correspondência entre objetos C++ e OTCL

Fonte: (GREIS)

Uma ilustração simplificada do passo-a-passo a partir da codificação de um *script* OTCL, sua execução pelo simulador e consequente produção de resultados, pode ser visualizada na figura 3.3. O NS-2 interpreta um *script* OTCL, que possui objetos que representam os componentes da rede e um agendador de eventos. Ao longo da simulação, arquivos que armazenam informações relevantes da rede são escritos para posterior análise. A análise visual do comportamento da rede também é possível e pode ser realizada através do software NAM (*Network AniMator*) (GREIS).

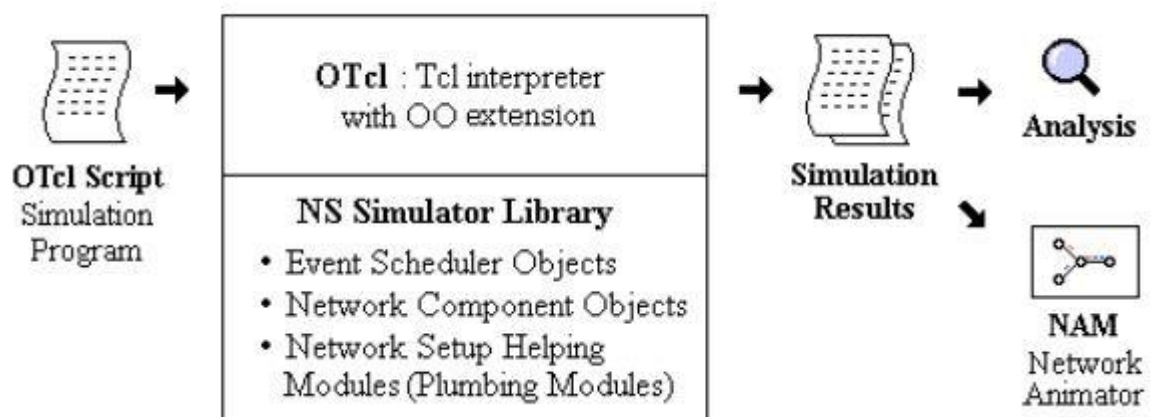


Figura 3.3: Ilustração da execução de uma simulação no NS-2

Fonte: (GREIS)

A noção de tempo no NS-2 é obtida através de unidades de simulação que podem ser associadas, para efeitos didáticos, a segundos. A rede é construída usando nós os quais são conectados por meio de enlaces. Eventos são escalonados para passar entre os nós através dos enlaces. Nós e enlaces podem ter várias propriedades associadas a eles. Agentes podem ser associados aos nós e eles são responsáveis pela geração de diferentes pacotes. A fonte de tráfego é uma aplicação ao qual é associado um agente particular. Os agentes precisam de um receptor que receberá seus pacotes. No caso do agente TCP (*Transmission Control Protocol*) esse receptor chama-se *sink* e tem a incumbência de gerar os pacotes de reconhecimento ACK (*Acknowledge*) (GREIS). A figura 3.4 ilustra a estrutura dos objetos de simulação no NS-2.

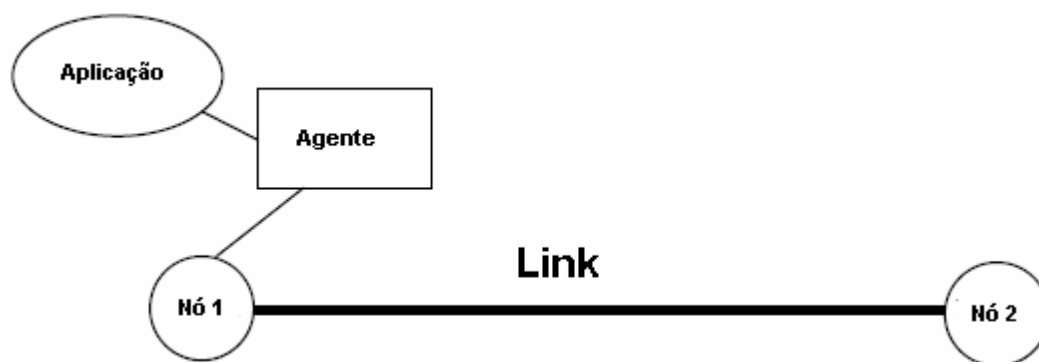


Figura 3.4: Estrutura dos objetos de simulação

Fonte: (GREIS)

O NS-2 possui diversas classes que simulam protocolos das camadas de rede, transporte e aplicação. Além disso, o software permite simulações de redes sem fio sendo possível configurar diversos parâmetros, como tipo de antena, propagação, protocolo de roteamento, entre outros. A implementação do padrão IEEE 802.11e não é presente na versão nativa do NS-2. Logo, para que a simulação seja viabilizada, o trabalho desenvolvido por (DEMARCH) será implementado no NS-2. Os passos para instalação do NS-2 estão descritos no anexo.

3.4 – Implementações no NS-2

Para realizar as avaliações foi utilizado o simulador NS-2 (versão 2.34), o qual recebeu alterações para implementar os recursos necessários. Por não estar presente na versão

nativa, o padrão IEEE 802.11e foi implementado através do trabalho desenvolvido por (DEMARCH). O código de simulação implementado está descrito no apêndice.

Para iniciar a simulação, foi preciso, inicialmente, ajustar a variável de ambiente que identifica o início da simulação, conforme a linha abaixo:

```
set ns [new Simulator]
```

Esta linha define a geração de uma instância do objeto simulador e a associa com a variável ‘ns’, realizando as tarefas de inicializar o formato dos pacotes, criar um escalonador de eventos e selecionar o formato padrão de endereçamento.

Além disso, foi preciso configurar comandos para geração de arquivos *trace* que permitiram a análise das simulações. As linhas abaixo mostram a sintaxe para esse tipo de saída:

```
set tf [open out.tr w]
```

```
$ns trace-all $tf
```

A criação da topologia da rede é um dos pontos primordiais de uma simulação. As linhas abaixo definem a criação dos nós e demonstram a sintaxe utilizada para a criação dos enlaces.

```
# Criação dos nós
```

```
for {set i 0} {$i < $numNode} {incr i} {
```

```
set n($i) [$ns node]
```

```
}
```

```
# Criação dos enlaces
```

```
for {set i 0} {$i < $numNode} {incr i} {
```

```
for {set j [expr ($i + 1)]} {$j < $numNode} {incr j} {
```

```
$ns duplex-link $n($i) $n($j) 1Mb 10ms DropTail
```

```
}
```

```
}
```

Para que se possa realizar a implementação de protocolos de transporte (TCP e UDP) é necessária a criação de agentes, que são componentes da arquitetura NS responsáveis pela simulação destes protocolos. Os agentes criam um canal de comunicação entre os nós

transmissor e receptor. O código abaixo mostra a criação de um agente TCP e a sua associação a um nó emissor de pacotes.

```
set tcp0 [new Agent/TCP]
```

```
$ns attach-agent $n0 $tcp0
```

Após o estabelecimento do canal de comunicação é necessário que um tráfego de uma determinada aplicação seja gerado e transmitido por este. O código abaixo demonstra a criação do tráfego FTP.

```
set ftp0 [new Application/ FTP]
```

```
$ftp0 attach-agent $tcp0
```

Visando a comparação do desempenho dos três métodos de associação, os testes foram realizados com os mesmos parâmetros escolhidos por (CARDOSO et al., 2009). A figura 3.5 relaciona os parâmetros gerais implementados no código de simulação.

Parâmetros Gerais	
Duração da simulação	200 segundos
Área de teste	300 x 400 metros quadrados
Quantidade de APs	3
Quantidade de BSS	1
Tipo de tráfego	FTP e HTTP
Tamanho do pacote TCP	1500 bytes
Tipo de canal	Channel/WirelessChannel
Modelo de antena	Antenna/OmniAntenna
Interface de rede	Phy/WirelessPhy
Camada MAC	Mac/802_11
Largura de banda	11Mb
TXOPLimit	8160µs

Figura 3.5: Exemplos de parâmetros configurados

O cenário de simulação apresentado neste capítulo servirá de base para aplicação e análise dos resultados comparados neste trabalho, conforme apresentado no Capítulo 4.

CAPÍTULO 4 – TESTES E RESULTADOS

Este capítulo evidencia a simulação proposta e documenta os resultados obtidos.

Os resultados gerados comparam o método de associação proposto neste trabalho com os resultados encontrados no trabalho realizado por (CARDOSO et al., 2009).

4.1 – Testes

Conforme descrito na seção 3.4, os testes foram realizados com os mesmos parâmetros utilizados por (CARDOSO et al., 2009) em seu trabalho sobre balanceamento de carga e virtualização.

Para alcançar os resultados obtidos, diversos problemas foram enfrentados com o NS-2. Dentre eles, a adaptação do código de simulação com os parâmetros previamente definidos por (CARDOSO et al., 2009). Além disso, a necessidade de adaptação do código-fonte do software para que as novas funções de controle de acesso ao meio disponibilizadas pelo padrão IEEE 802.11e fossem implementadas.

Os testes foram realizados visando comparar os métodos de associação em termos de latência, vazão e índice de justiça. Após diversas adaptações, os resultados obtidos foram próximos aos encontrados para os métodos de balanceamento de carga utilizando virtualização e DLBA.

4.2 – Análise dos Resultados

As avaliações incluem simulações com quatro tipos de estações:

- Estações Legadas: simulação realizada neste trabalho, que relaciona o processo de associação tradicional com o novo padrão de QoS implementado na norma IEEE 802.11e.
- Estações com DLBA: utilizam o algoritmo de associação DLBA.
- Estações com Virtualização Estática: utilizam o algoritmo de balanceamento de carga utilizando virtualização, com tempos ativos estáticos.
- Estações com Virtualização Dinâmica: utilizam o algoritmo de balanceamento de carga utilizando virtualização, com tempos ativos dinâmicos.

A figura 4.1 ilustra a latência (ou tempo) média por página *web* observada nas estações legadas em função do número de estações especiais. Essa métrica permite avaliar quão amigáveis são as propostas de escolha de AP das estações especiais com relação ao tráfego existente. Mesmo com os benefícios propostos pelo padrão IEEE 802.11e, as propostas de associação Legada e DLBA apresentaram um desempenho ruim, aumentando de forma significativa o tempo médio para visualização das páginas *web*. Os virtualizados apresentam o menor impacto nas estações legadas, aumentando sua vantagem para as outras soluções à medida em que cresce o número de estações especiais.

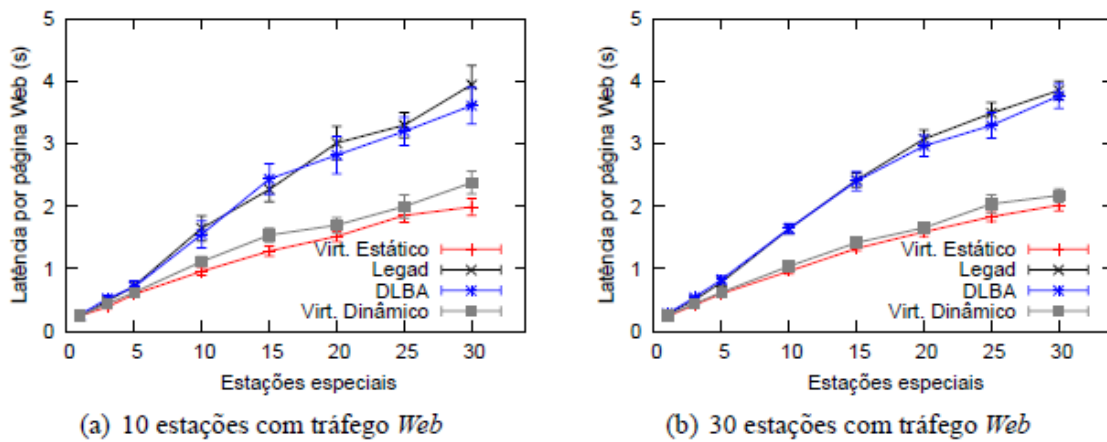


Figura 4.1: Gráficos de latência

A figura 4.2 apresenta a vazão agregada em função do número de estações especiais. Com os gráficos, é possível observar que a vazão agregada do Virtualizado é muito próxima a do Legado. Vale salientar que, devido ao pequeno número de APs, existe uma alta probabilidade de cada AP ter pelo menos uma estação especial associada. Dado esse fato, mais a característica do TCP de utilizar toda a capacidade disponível, leva-se a utilização máxima da rede na maioria dos cenários. Desse forma, o Virtualizado, mesmo distribuindo e alternando as estações nos APs, não é capaz de obter uma vazão agregada superior às outras abordagens. Portanto, de forma geral, os algoritmos de associação apresentaram resultados similares em relação a vazão agregada.

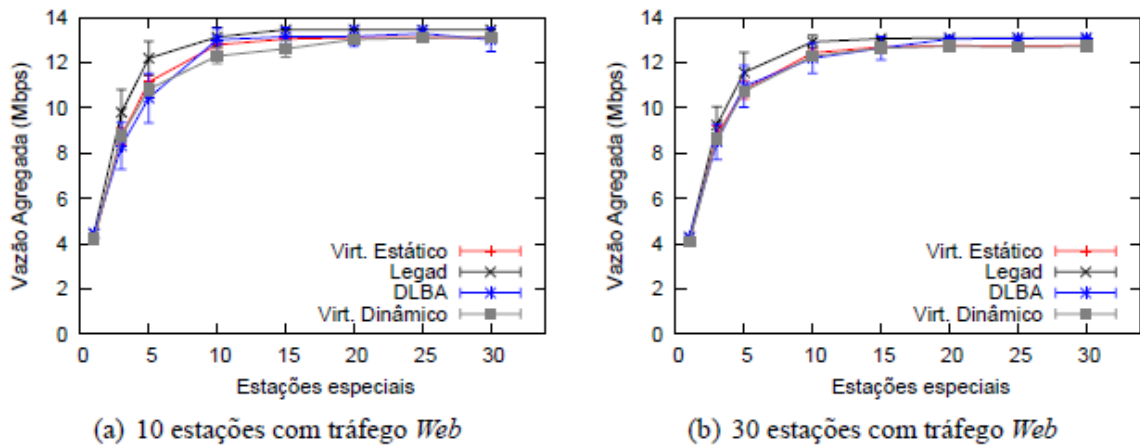


Figura 4.2: Gráficos de vazão

A figura 4.3 exibe o índice de justiça em função do número de estações especiais.

O índice de justiça é definido pela equação 4.1, onde x_i é a vazão obtida por cada uma das estações, e N é a quantidade de estações (JAIN et al., 1984). Esse índice representa o quão igualitária é a distribuição de um recurso, que nesse contexto é a capacidade disponível da rede formada pelos três APs. Quanto mais próximo de 1, mais justa é a distribuição. Os gráficos ilustram que os métodos Legado e DLBA, de fato, escondem uma deficiência significativa. Os valores apresentados por esses métodos são menores e com grandes variâncias. Isso demonstra como o mecanismo Virtualizado proposto por (CARDOSO et al., 2009) realiza um balanceamento da carga entre os diversos APs, garantindo um compartilhamento mais justo dos recursos da rede. As estações virtualizadas com tempos estáticos perdem na justiça por manter más conexões por mais tempo.

$$fi = \frac{(\sum_{i=1}^N x_i)^2}{N \times (\sum_{i=1}^N (x_i)^2)} \quad Eq. (4.1)$$

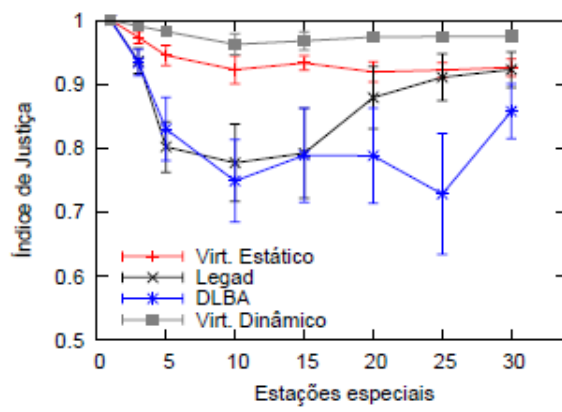
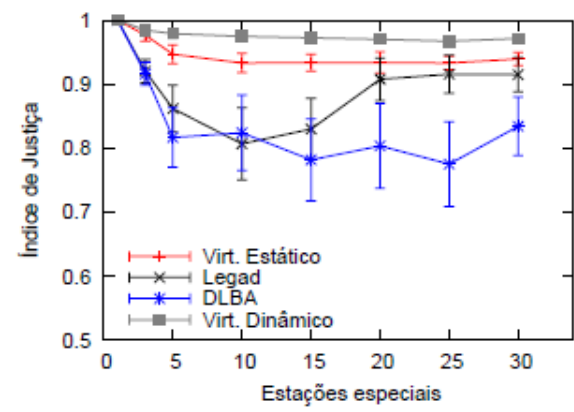
(a) 10 estações com tráfego *Web*(b) 30 estações com tráfego *Web*

Figura 4.3: Gráficos de índice de justiça

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1 – Conclusões

O estudo de métodos de associação em redes 802.11 levantou alguns pontos importantes sobre os problemas que afetam o desempenho das redes IEEE 802.11 operando no modo infraestruturado. Em primeiro lugar, o problema de desempenho oferecido pela abordagem tradicional. Por ter como única métrica de associação a relação sinal-ruído, o padrão IEEE 802.11 não garante o uso eficiente dos recursos. Com a popularização das redes sem fio, é comum encontrar cenários onde dois ou mais pontos de acesso podem estar utilizados a partir de uma mesma localização. Logo, existe um desequilíbrio no número de estações associadas em cada AP, oferecendo aos usuários um serviço muitas vezes ruim.

O estudo desses problemas também envolveu uma pesquisa sobre diferentes métodos de associação em redes 802.11. Dentre eles, o balanceamento dinâmico de carga e o balanceamento de carga utilizando virtualização foram analisados.

Neste trabalho foi realizado um cenário de simulação com o novo padrão de QoS. Medidas de desempenho em termos de vazão, latência e justiça foram obtidos. Os resultados foram comparados aos apresentados no trabalho realizado por (CARDOSO et al., 2009), onde um balanceamento de carga utilizando virtualização foi proposto e simulado. As comparações tem como objetivo demonstrar em que situações um método foi mais vantajoso do que o outro.

Os resultados obtidos com a simulação demonstram que a abordagem tradicional, mesmo com o novo padrão de QoS, ainda apresenta deficiências em relação a métodos que balanceiam a carga entre os diversos APs. Mesmo com diferenças mínimas, a análise dos resultados permite observar que o uso de virtualização poderia oferecer uma distribuição mais justa dos recursos da rede.

Portanto, acredita-se que o processo de associação entre estação e AP em redes 802.11 ainda apresenta inúmeras possibilidades a serem exploradas. Mesmo com o crescimento vertiginoso dessas redes, os equipamentos disponíveis no mercado ainda não contam com métodos que balanceiam a carga entre os APs. Com isso, a distribuição dos recursos seria mais justa e a degradação do desempenho das redes 802.11 públicas seria reduzida.

5.2 – Sugestões para Trabalhos Futuros

Com os estudos e pesquisas para o desenvolvimento deste trabalho surgiram novas ideias para projetos futuros:

- Comparação dos três métodos de associação a outros mecanismos existentes na literatura;
- Novos cenários de simulação para avaliação de desempenho;
- Implementação do mecanismo de virtualização analisado neste trabalho em interfaces IEEE 802.11 disponíveis comercialmente que utilizem o *driver* MadWifi de código aberto.

REFERÊNCIAS

802.11. Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications. IEEE Standard, 1999.

802.11. Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications. IEEE Standard, 2007.

802.11k. Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: Radio Resource Measurement of Wireless LANs. IEEE Standard, 2008.

802.11n. Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: Enhancements for Higher Throughput. IEEE Standard, 2009.

ATHANASIOU, G.; KORAKIS, T.; ERCETIN O.; TASSIULAS, L.(2007). Dynamic cross-layer association in 802.11-based mesh networks. In INFOCOM 2007. 26th IEEE International Conference on Computer Communications. IEEE, pages 2090-2098.

BALACHANDRAN, A.; BAHL, P.; VOELKER, G. M. (2002). Hot-spot congestion relief in public-area wireless networks. In WMCSA '02: Proceedings of the Fourth IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications, pages 70-80, Washington, DC, USA. IEEE Computer Society.

BEJERANO, Y.; HAN, S.-J.; Li, L. E. (2004). Fairness and load balancing in wireless LANs using association control. In MobiCom'04: Proceedings of the 10th annual international conference on Mobile computing and networking, pages 315–329, New York, NY, USA. ACM.

CARDOSO, Kleber; OLIVEIRA, Tibério; REZENDE, José; SILVA, Marcel. Balanceamento de carga utilizando virtualização em redes IEEE 802.11. In: Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos, 2009, Recife. XXVII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos, 2009. p. 511-524.

CHANDRA, R. A virtualization architecture for wireless network cards. 2006. 183 f. Tese (Doutorado) – Cornell University, Ithaca, NY, USA. Adviser-Kenneth P. Birman.

DEMARCH, D. 'New EDCA/HCCA Extension Patch for NS-2'. Publicação Web. Disponível em: <<http://www.das.ufsc.br/~douglas/>>. Acesso em: 19 jun. 2011.

DEMARCH, D. (2007). Uma Proposta de Escalonamento Confiável para Redes Sem Fio Baseadas no Padrão IEEE 802.11/11e. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. 88 p.

FOROUZAN, Behrouz A. Comunicação de dados e redes de computadores. 4ª edição, São Paulo, McGraw-Hill, 2008.

GREIS, M. Tutorial for the Network Simulator "ns". Disponível em <<http://www.isi.edu/nsnam/ns/tutorial/>>. Acesso em: 19 jun. 2011.

HAYKIN, S.; MOHER, M. Sistemas modernos de comunicação wireless. 1ª edição, Porto Alegre, Bookman, 2008.

Jain, R. K., Chiu, D.-M. W., and Hawe, W. R. (1984). A Quantitative Measure of Fairness and Discrimination for Resource Allocation in Shared Computer System. DEC Research Report TR-301, Digital Equipament Corporation, Maynard, MA, USA.

JIWIRE. JiWire Mobile Audience Insights Report Q2 2010. Disponível em <<http://www.jiwire.com>>. Acesso em: 19 jun. 2011.

PAPANIKOS, I.; LOGOTHETIS, M. (2001). A study on dynamic load balance for IEEE 802.11b wireless LAN. In 8th International Conference on Advances in Communications and Control, COMCON 8, Rethymna, Crete, Greece.

RAMINE, I.; SAVAGE, S. (2005). SyncScan – Pratical fast handoff for 802.11 infrastructure network. In INFOCOM 2005. Pages 675-684.

SHEU, S.-T.; WU, C.-C. (1999). Dynamic Load Balance Algorithm (DLBA) for IEEE 802.11 wireless LAN. *Tamkang Journal of Science and Engineering*, 2:45–52.

SILVA, M. W. R. Alocação de canal em redes sem fio IEEE 802.11 independentes. 2006. 71f. Dissertação (Mestre em Ciências)–Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

VILLEGAS, E. G.; FERRE, R. V.; ASPAS, J. P. (2008). Cooperative load balancing in IEEE 802.11 networks with cell breathing. *Computers and Communications*, 2008. ISCC 2008. IEEE Symposium on, pages 1133–1140.

WIGLE. WiGLE – Wireless Geographic Logging Engine – Networks Over Time, 2010. Disponível em <www.wigle.net>. Acesso em: 19 jun. 2011.

ZAMAN, N. ‘NS2 in Ubuntu 10’. Publicação Web.

Disponível em: <<http://pt.scribd.com/Noor%20Zaman>>. Acesso em: 19 jun. 2011.

APÊNDICE – CÓDIGO DE SIMULAÇÃO

```

#Monografia
# *****

# 802.11b 802.11e
# *****

Antenna/OmniAntenna set Gt_ 1
Antenna/OmniAntenna set Gr_ 1

Propagation/Shadowing set pathlossExp_ 4
Propagation/Shadowing set std_db_ 0

Phy/WirelessPhy set L_ 1.0
Phy/WirelessPhy set freq_ 2.472e9
Phy/WirelessPhy set bandwidth_ 11Mb
Phy/WirelessPhy set Pt_ 0.031622777
Phy/WirelessPhy set CPTresh_ 10.0
Phy/WirelessPhy set CSTresh_ 5.011872e-12
Phy/WirelessPhy set RXThresh_ 5.82587e-09

Mac/802_11 set dataRate_ 11Mb
Mac/802_11 set basicRate_ 1Mb

# *****

# Definições
# *****

set opt(chan) Channel/WirelessChannel    ;# tipo de canal
set opt(prop) Propagation/TwoRayGround    ;# modelo de propagação
set opt(netif) Phy/WirelessPhy           ;# interface de rede
set opt(mac) Mac/802_11                  ;# camada MAC
set opt(ifq) Queue/DropTail/PriQueue     ;# fila

```

```

set opt(ll) LL ;# camada link layer
set opt(ant) Antenna/OmniAntenna ;# modelo de antena
set opt(ifqlen) 50 ;# máximo de pacotes em uma ifq
set opt(nn) 60 ;# número de estações sem fio
set opt(adhocRouting) DSDV ;# protocolo de roteamento

set opt(cp) ""
set opt(sc) ""
set opt(x) 300 ;# x coordenada de topologia
set opt(y) 400 ;# y coordenada de topologia
set opt(seed) 0.0 ;# random seed
set opt(stop) 200 ;# duração da simulação

set opt(ftp1-start) 0.0

set num_wired_nodes 2
#set num_bs_nodes 60

# *****
# Principal
# *****

set ns_ [new Simulator] ;# criar instância do simulador

$ns_ node-config -addressType hierarchical ;# configurar endereçamento hierárquico
#$ns_ set-address-format expanded ;# expandir o formato dos nós

AddrParams set domain_num_ 4 ;# número de domínios
lappend cluster_num 2 1 1 1 ;# número de subdomínios(cluster) em cada
domínio
AddrParams set cluster_num_ $cluster_num
lappend eilastlevel 1 1 1 1 ;# número de nós em cada subdomínio(cluster) de
cada domínio (acrescentar estações)
AddrParams set nodes_num_ $eilastlevel

```



```

set tracefd [open monowir3-out.tr w]
set namtrace [open monowir3-out.nam w]
$ns_ trace-all $tracefd
$ns_ namtrace-all-wireless $namtrace $opt(x) $opt(y)

set topo [new Topography]                ;# criar objeto topografia

$topo load_flatgrid $opt(x) $opt(y)      ;# definir topologia

create-god [expr $opt(nn) + 3]           ;# criar arquivo Deus
puts "milla"
# *****

# LAN
# *****

set temp {0.0.0 0.1.0}                   ;# endereçamento hierárquico
for {set i 0} {$i < $num_wired_nodes} {incr i} {
    set W($i) [$ns_ node [lindex $temp $i]]
}
puts "milla2"
# *****

# WLAN
# *****

$ns_ node-config -mobileIP ON \
    -adhocRouting $opt(adhocRouting) \
    -llType $opt(ll) \
    -macType $opt(mac) \
    -ifqType $opt(ifq) \
    -ifqLen $opt(ifqlen) \
    -antType $opt(ant) \
    -propType $opt(prop) \
    -phyType $opt(netif) \
    -channelType $opt(chan) \
    -topoInstance $topo \

```

```

-wiredRouting ON \
    -agentTrace ON \
    -routerTrace ON \
    -macTrace OFF

```

```

set AP(0) [$ns_ node 1.0.0]
$AP(0) random-motion 0
set AP(1) [$ns_ node 2.0.0]
$AP(1) random-motion 0
set AP(2) [$ns_ node 3.0.0]
$AP(2) random-motion 0

```

Posição dos APS

```

$AP(0) set X_ 1.000000000000
$AP(0) set Y_ 1.000000000000
$AP(0) set Z_ 0.000000000000

```

```

$AP(1) set X_ 200.000000000000
$AP(1) set Y_ 200.000000000000
$AP(1) set Z_ 0.000000000000

```

```

$AP(2) set X_ 1.000000000000
$AP(2) set Y_ 200.000000000000
$AP(2) set Z_ 0.000000000000

```

Estações móveis

```

$ns_ node-config -wiredRouting OFF

```

```

for {set j 1} {$j <= $opt(nn)} {incr j} {
    set TW($j) [$ns_ node 1.0.$j]
    set node_($j) $TW($j)
    set TW($j)address [AddrParams addr2id [$TW($j) node-addr]]
    [$TW($j) set regagent_] set home_agent_ $TW($j)address
}

```

```

}
#set TW1 [$ns_ node 1.0.1]
#set node_(0) $TW1
#set TW1address [AddrParams addr2id [$TW1 node-addr]]
#[$TW1 set regagent_] set home_agent_ $TW1address

#set TW2 [$ns_ node 1.0.2]
#set node_(0) $TW2
#set TW1address [AddrParams addr2id [$TW2 node-addr]]
#[$TW2 set regagent_] set home_agent_ $TW1address

# movimento da estação TW1

$TW(1) set Z_ 0.000000000000
$TW(1) set Y_ 2.000000000000
$TW(1) set X_ 2.000000000000

# TW1 inicia o movimento para AP1
$ns_ at 50.000000000000 "$TW(1) setdest 180.000000000000 180.000000000000
20.000000000000"

# Depois volta para AP0
$ns_ at 150.000000000000 "$TW(1) setdest 2.000000000000 2.000000000000
20.000000000000"

# *****
# LINK
# *****

for {set i 0} {$i < $numNode} {incr i} {
for {set j [expr ($i + 1)]} {$j < $numNode} {incr j} {
$ns duplex-link $n($i) $n($j) 1Mb 10ms DropTail
}
}

$ns_ duplex-link-op $W(0) $W(1) orient down

```

```

$ns_ duplex-link-op $W(1) $AP(0) orient left-down
$ns_ duplex-link-op $W(1) $AP(1) orient down
$ns_ duplex-link-op $W(1) $AP(2) orient right-down

# *****

# Conexão
# *****

set tcp1 [new Agent/TCP]
$tcp1 set fid_ 2
set sink1 [new Agent/TCPSink]
$ns_ attach-agent $W(0) $tcp1
$ns_ attach-agent $TW(1) $sink1
$ns_ connect $tcp1 $sink1
set ftp1 [new Application/FTP]
$ftp1 attach-agent $tcp1
$ns_ at 50.0 "$ftp1 start"

# Script de origem da conexão e de movimento dos nós
if { $opt(cp) == "" } {
    puts "*** NOTE: no connection pattern specified."
    set opt(cp) "none"
} else {
    puts "Loading connection pattern..."
    source $opt(cp)
}
if { $opt(sc) == "" } {
    puts "*** NOTE: no scenario file specified."
    set opt(sc) "none"
} else {
    puts "Loading scenario file..."
    source $opt(sc)
    puts "Load complete..."
}

```

Definir posição inicial do nó no NAM

```
for {set i 1} {$i <= $opt(nn)} {incr i} {
    $ns_ initial_node_pos $node_($i) 20
}
```

Chamar todos os nós quando a simulação acabar

```
for {set i 1} {$i <= $opt(nn)} {incr i} {
    $ns_ at $opt(stop).0 "$node_($i) reset";
}
```

```
$ns_ at $opt(stop).0 "$AP(0) reset";
```

```
$ns_ at $opt(stop).0 "$AP(1) reset";
```

```
$ns_ at $opt(stop).0 "$AP(2) reset";
```

```
$ns_ at $opt(stop).0002 "puts \"NS EXITING...\" ; $ns_ halt"
```

```
$ns_ at $opt(stop).0001 "stop"
```

```
proc stop {} {
    global ns_ tracefd namtrace
    close $tracefd
    close $namtrace
}
```

Cabeçalhos para o arquivo trace

```
puts $tracefd "M 0.0 nn $opt(nn) x $opt(x) y $opt(y) rp \
    $opt(adhocRouting)"
```

```
puts $tracefd "M 0.0 sc $opt(sc) cp $opt(cp) seed $opt(seed)"
```

```
puts $tracefd "M 0.0 prop $opt(prop) ant $opt(ant)"
```

```
puts "Starting Simulation..."
```

```
$ns_ run
```

ANEXO – INSTALAÇÃO DO NS-2

Fonte: (zaman)

Este manual descreve os passos para instalação do NS-2 no Ubuntu 10.04.

1. Install necessary tools for building:

```
sudo apt-get install build-essential autoconf automake libxmu-dev gcc-4.3
```

2. It turns out that otcl does not like the version of gcc installed by default in Lucid. So go ahead and change ns-allinone-2.34/otcl-1.13/Makefile.in. Find the line that says:

```
CC= @CC@
```

and change it to:

```
CC= gcc-4.3
```

3. Now follow the following steps for installation of ns-allinone 2.34 and it will work with your machine. (copy ns-allinone-2.34.tar.gz). Suppose that there is "ns-allinone-2.33.tar.gz" in current directory (e.g. "~/" for me is "/home/noor").

All steps are done in Terminal, so open a terminal in Accessories/Terminal. To extract the file:

```
tar xvfz ./ns-allinone-2.33.tar.gz
```

4. Change your directory within terminal as following way

```
$ cd /home/noor$ cd /home/noor/ns-allinone-2.34
```

5. Download & install some packages from repository if needed (Now its optional)

```
$ sudo apt-get install build-essential autoconf automake libxmu-dev
```

6. Install the ns2

```
$ cd ns-allinone-2.34
```

```
$ ./install
```

7. Edit some paths

```
$ gedit ~/.bashrc
```

8. Put these lines on that file in the last. Off course, you might change /home/noor for it depends on where you extract ns-allinone-2.34.tar.

```
#LD_LIBRARY_PATHOTCL_LIB=/home/noor/ns-allinone-2.34/otcl
```

```
1.13NS2_LIB=/home/noor/ns-allinone-
```

```
2.34/libX11_LIB=/usr/X11R6/libUSR_LOCAL_LIB=/usr/local/libexport
```

```
LD_LIBRARY_PATH=$LD_LIBRARY_PATH:$OTCL_LIB:$NS2_LIB:$X11_LIB:$USR_LO
```

```
CAL_LIB#TCL_LIBRARYTCL_LIB=/home/noor/ns-allinone
```

```
2.34/tcl8.4.18/libraryUSR_LIB=/usr/libexportTCL_LIBRARY=$TCL_LIB:$USR_LIB#
```

```
PATHXGRAPH=/home/noor/ns-allinone-2.34/bin:/home/noor/ns-allinone-
```

```
2.34/tcl8.4.18/unix:/home/noor/ns-allinone-2.34/tk8.4.18/unix:/home/noor/ns-allinone-
```

```
2.34/xgraph-12.1/NS=/home/noor/ns-allinone-2.34/ns-2.34/NAM=/home/noor/ns-allinone-
```

```
2.34/nam-1.13/export PATH=$PATH:$XGRAPH:$NS:$NAM
```

9. Validate it (take very long time compare to install process)

```
$ cd ns-2.34$ ./validate
```

10. Let it take effect immediately

```
$ source ~/.bashrc
```

11. Try to run it as following way, by just typing ns with terminal

```
$ ns
```

12. If the installation is successful, then you will be able to see % at the command prompt.

Type following command to exit.

```
% exit
```